

REPÚBLICA DE COLOMBIA  
UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA: INGENIERÍA AMBIENTAL



DISEÑO DE UN SISTEMA DE ASPERSIÓN PARA EL MANEJO ADECUADO Y  
REUTILIZACIÓN DEL LIXIVIADO TRATADO DE UN RELLENO SANITARIO.

Autores: ORLANDO JOSÉ GRANADOS SÁNCHEZ

JULIO MÁRQUEZ MAQUEZ DIX

Barranquilla, 2019

REPÚBLICA DE COLOMBIA  
UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA: INGENIERÍA AMBIENTAL



DISEÑO DE UN SISTEMA DE ASPERSIÓN PARA EL MANEJO ADECUADO Y  
REUTILIZACIÓN DEL LIXIVIADO TRATADO DE UN RELLENO SANITARIO.

Trabajo presentado como requisito para optar el grado de:

INGENIERO AMBIENTAL

Autores: Orlando José Granados Sánchez

Julio Márquez Dix

Directora: Aleana Cahuana Mojica

Barranquilla, 2019

## Carta de Aprobación del Tutor

## **Dedicatoria**

---

El presente proyecto lo dedicamos principalmente a Dios, por ser nuestra luz, fuerza y el umbral de sabiduría en todos los escalones vividos durante el proceso de inicio, moldeado y culminación de nuestra investigación.

A nuestros padres por ser los pilares fundamentales en nuestro recorrido.

A nuestras familias por el amor incondicional, paciencia, tolerancia y entrega para motivarnos al ver sus sacrificios y dar frutos, pudiendo lograr lo mejor de nosotros.

## **Agradecimientos**

---

A Dios, por darnos sabiduría, entendimiento y brindarnos el espacio justo y necesario dentro de todas nuestras obligaciones para alcanzar la meta propuesta. A nuestras familias y todo nuestro cuerpo académico por el incansable y total apoyo para enseñarnos, guiarnos y motivarnos para lograr los objetivos trazados a lo largo de nuestra carrera.

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas y colegas me han prestado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. En primer lugar, a mi padre, quien me enseñó que el mejor conocimiento que se puede tener es el que se aprende por sí mismo. También está dedicado a mi madre, quien me enseñó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia por todo el conocimiento transmitido, por último, a mi compañero Julio Márquez por animarme constantemente a culminar esta meta.

## **Resumen**

---

El Relleno Sanitario Parque Ambiental Los Pocitos que pertenece a la empresa Triple A S.A. E.S.P., cuenta con un sistema de tratamiento de lixiviados y el producto obtenido (En este caso el lixiviado tratado) es uno de los productos que genera inconvenientes, siendo en la actualidad un problema darle disposición final a este residuo. El lixiviado tratado puede ser reutilizado de la mejor forma posible en las mismas instalaciones o en su defecto, ser erradicado para alargar la vida útil del relleno sanitario. Analizando las características del lixiviado, las condiciones ambientales, atmosféricas y estructurales del relleno sanitario; se encuentra que al efectuar una prueba de aspersión el lixiviado tendría un proceso de evaporación si se aplica una película delgada y así disminuir los niveles de la laguna de lixiviado tratado. Si el camino es viable, se puede aplicar un diseño de un sistema de aspersión más eficiente en los vasos semiclausurados de una forma rentable para la empresa.

## **Abstract**

Los Pocitos the Environmental Sanitary Landfill belongs to the company Triple A S.A. E.S.P., has a leachate treatment system and the product obtained (in this case the treated leachate) is one of the products that generates disadvantages, being at present a problem to give final disposal to this waste. The treated leachate can be reused in the best possible way in the same facilities or, failing that, be eradicated to extend the useful life of the landfill. Analyzing the characteristics of the leachate, the environmental, atmospheric and structural conditions of the landfill; it is found that in performing a spray test the leachate would have an evaporation process if a thin film is applied and thus lower the levels of the treated leach pond. If the path is viable, a design of a more efficient sprinkler system can be applied to the semi-blind vessels in a cost-effective way for the company.

**TABLA DE CONTENIDO**

---

Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Resumen .....	vi
TABLA DE CONTENIDO .....	viii
LISTA DE TABLAS .....	xiv
LISTA DE FIGURAS .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I .....	2
EL PROBLEMA .....	2
1. Planteamiento del Problema .....	2
1.1. Formulación del Problema. ....	4
2. Justificación e Importancia de la Investigación .....	4
3. Objetivo de la investigación .....	6
3.1. Objetivo General. ....	6
3.2. Objetivos específicos.....	6
4. Delimitación de la Investigación .....	6
CAPITULO II .....	7
MARCO TEÓRICO .....	7



1.	Antecedentes de la investigación. ....	7
2.	Bases Teóricas.....	14
2.1.	Residuos Sólidos.....	14
2.2.	Rellenos Sanitarios .....	19
	Tratamiento Actual del Lixiviado PTL .....	24
	Tratamiento de Lixiviados .....	24
2.3.	Procesos anaerobios.....	25
2.4.	Procesos aerobios. ....	25
2.5.	Bioreactores con Membrana (MBR) .....	26
2.6.	Osmosis Inversa.....	27
2.7.	Proceso de evaporación y sus variables.....	27
	Sistemas de aspersión .....	28
3.	Marco Conceptual .....	30
	Aspersión.....	30
	Biodegradación .....	30
	Biogás.....	30
	Carga Orgánica.....	30
	Contaminante .....	31
	Disposición Final .....	31
	Drenaje .....	31

Efluente .....	31
Evaporación.....	31
Geomembrana .....	32
Humedad .....	32
Impactos Ambientales .....	32
Infiltración.....	32
Lixiviado .....	32
Permeabilidad.....	32
Planta de tratamiento (EDAR) .....	33
Relleno Sanitario .....	33
Residuos Sólidos .....	33
Revegetalización .....	33
4. MARCO CONTEXTUAL .....	33
4.1. Localización Externa .....	33
4.2. Localización Interna .....	34
4.3. Descripción de las Condiciones ambientales y climatológicas .....	36
Red hidrológica .....	36
Geología .....	37
Hidrogeología .....	37
Geomorfología.....	37

Zona de vida y biodiversidad .....	38
Flora.....	38
Fauna .....	39
Clima .....	40
Precipitación .....	40
Temperatura.....	41
Vientos.....	41
Humedad relativa.....	42
Evaporación .....	42
Brillo solar .....	43
Nubosidad.....	43
Balance hídrico .....	43
5. MARCO LEGAL .....	44
5.1. Constitución Nacional, La Constitución Política de Colombia de 1991 .....	44
5.2. Ley 9 de Enero 24 de 1979.....	44
5.3. Ley 99 de Diciembre 22 de 1993.....	45
5.4. Ley 142 de 1994: .....	45
5.5. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - <i>RAS 2000</i> .	
46	
5.6. Decreto 2811 de Diciembre 18 de 1974 .....	46

5.7. Decreto 1594 de Junio 26 de 1984 .....	46
5.8. Decreto 605 de 1996.....	46
5.9. Decreto 1713 de 6 de agosto de 2002.....	46
5.10. Decreto 838 de 2005 (marzo 23): .....	47
5.11. Decreto 3930 de 2010: .....	47
5.12. Decreto 2981 de 2013 .....	47
6. MARCO INSTITUCIONAL .....	48
6.1. Generalidades de la empresa .....	48
<i>Razón social.</i> .....	48
Dirección – teléfonos: .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Misión: .....	48
Visión: .....	48
Valores corporativos .....	48
6.2. Estructura organizacional relleno sanitario .....	49
Sistemas de gestión .....	49
7. MARCO METODOLÓGICO .....	50
7.1. IDENTIFICAR LA CANTIDAD PROMEDIO DE LIXIVIADO QUE ESTA SIENDO TRATADO POR LA PLANTA PARA POSTERIOR MANEJO Y/O DISPOSICIÓN FINAL.....	54
7.2. CONSTRUCCIÓN DE LA PRUEBA PILOTO .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

7.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ASPERSIÓN.....	77
7.4. RECOMENDACIONES .....	88
8. PRESUPUESTO .....	92
CONCLUSIÓN .....	93
BIBLIOGRAFIA.....	95
ANEXOS.....	100

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1. <i>Concentraciones típicas de compuestos en cantidades trazas encontradas en el gas de 66 vertederos RSU (EPA).</i> .....	17
Tabla 2. <i>Características fisicoquímicas de los lixiviados del relleno sanitario La Esmerald</i>	19
Tabla 3. <i>Programación de vida útil del relleno sanitario.</i> .....	56
Tabla 4 <i>Caudal Manejado De Lixiviado Año (2014).</i> .....	58
Tabla 5 <i>Caudal Manejado De Lixiviado Año (2015).</i> .....	59
Tabla 6 <i>Caudal Manejado De Lixiviado Año (2016).</i> .....	60
Tabla 7 <i>Caudal Manejado De Lixiviado Año (2017).</i> .....	62
Tabla 8 <i>Caudal Producido y Tratado de Lixiviado.</i> .....	64
Tabla 9 <i>Condiciones climáticas durante el mes de Junio 2017.</i> .....	69
Tabla 10 <i>Eficiencia de la prueba piloto – Tiempo Seco.</i> .....	72
Tabla 11 <i>Condiciones climáticas durante el mes de Octubre 2017.</i> .....	74
Tabla 12 <i>Eficiencia de la prueba piloto – Tiempo Nublado.</i> .....	75
Tabla 13 <i>Datos y esquema básico del sistema de aspersión.</i> .....	79
Tabla 14 <i>Coeficiente de resistencia de la contracción súbita.</i> .....	84

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 3. Proceso Evaporación Relleno.....</i>	28
<i>Figura 4. Plano Externo Relleno Sanitario Barranquilla. ....</i>	34
<i>Figura 5. Plano Interno Relleno Sanitario. ....</i>	35
<i>Figura 6. Red Hidrológica - Zona De Disposición Final.....</i>	36
<i>Figura 7. Precipitación Anual Ciudad Barranquilla. ....</i>	40
<i>Figura 8. Días de lluvia presentados en la región durante el año. ....</i>	41
<i>Figura 9. Evaporación durante el año.....</i>	43
<i>Figura 10. Organigrama del Relleno Sanitario Parque Ambiental Los Pocitos .....</i>	49
<i>Figura 11. Caudales Lixiviados Manejados Año 2014.....</i>	58
<i>Figura 12. Caudales Lixiviados Manejados Año 2015.....</i>	60
<i>Figura 13. Caudales Lixiviados Manejados Año 2016.....</i>	61
<i>Figura 14. Caudales Lixiviados Manejados Últimos Años. ....</i>	65
<i>Figura 15. Jarillón en arcilla.....</i>	67
<i>Figura 16. Material sintético. ....</i>	67
<i>Figura 17. Aspersor tipo de impacto .....</i>	68
<i>Figura 18. Prueba Tiempo soleado. ....</i>	69
<i>Figura 19. Recolección del lixiviado en la prueba de aspersion. ....</i>	70
<i>Figura 20. Aspersión directamente sobre el terreno .....</i>	72
<i>Figura 21. Cantidad de lixiviado recolectado en la prueba .....</i>	72
<i>Figura 22. Tiempo nublado.....</i>	73
<i>Figura 23. Retención de la prueba sobre el material sintético.....</i>	73

*Figura 24. Recolección del lixiviado en el material sintético. .Error! Bookmark not defined.*

*Figura 25. Bosquejo Sistema De Aspersión..... 78*



## INTRODUCCIÓN

El Relleno Sanitario Parque Ambiental Los Pocitos es uno de los rellenos más reconocidos por la eficiencia en la disposición final de los residuos sólidos ordinarios y la tecnología que aplica en sus procesos. Aunque son puntos positivos para la operatividad del relleno, cuenta con una dificultad y es la disposición final del lixiviado tratado que se almacena en una laguna de capacidad de 6.000 m<sup>3</sup>, esta problemática se ha analizado por mucho tiempo para eliminarla. Tanto el lixiviado tratado como el crudo, al tener una alta carga orgánica se puede evaporar con las mismas características del agua y esto da pie para que se pueda diseñar un sistema donde se evapore el lixiviado tratado sin que genere alguna repercusión al medio ambiente y el entorno del relleno sanitario. Uno de los métodos para colaborar con la evaporación del fluido, puede ser aplicando un sistema de aspersión en un lugar determinado.

Un sistema de aspersión aplicado en un terreno plano que está en óptimas condiciones y considerando las condiciones climáticas en el entorno del relleno, debería ser viable si se aplica una pequeña película de lixiviado tratado sobre los vasos semiclausurados del relleno y evaporarse sin generar algún estancamiento o escorrentía sobre el área de trabajo; esto se debe convalidar con pruebas pilotos durante varios días en tiempo seco y nublado para ver la efectividad del proceso de evaporación del lixiviado tratado. También se verifica si en todo el proceso de la prueba, el lixiviado que cae en el área de trabajo presenta algún estancamiento para considerar si será fácilmente absorbido por el terreno.

La prioridad de las pruebas piloto, es proponer y entregar unas recomendaciones eficientes del sistema de aspersión que se ajuste a las condiciones del relleno sanitario para lograr la reducción de los niveles de la laguna de lixiviado tratado y aumentar el caudal de trabajo de la planta de tratamiento, para que la empresa pueda mejorar aún más las condiciones del proceso.

## CAPITULO I

### EL PROBLEMA

---

#### **1. Planteamiento del Problema**

---

Una de las principales afecciones al medio ambiente es la excesiva generación per cápita de residuos, estos por mucho tiempo se han dispuesto en rellenos a cielo abierto sin las medidas que impidan que sigan contaminando. Sin embargo, en la actualidad los rellenos sanitarios es uno de los métodos más utilizados en el mundo para la disposición final de residuos sólidos al haber mostrado ser una forma barata de tratamiento de los residuos en comparación con procedimientos como la incineración. (Renou, Givaudan, Poulain, & Dirassouyan, 2008).

Uno de los problemas más importantes que conlleva el diseño y mantenimiento de un relleno sanitario es la gestión de los lixiviados que se generan los cuales, dependen del tipo de residuo depositado y la edad del mismo. (Neczaj, Kacprzak, Kamizela, Lach, & Okoniewska, 2008).

El relleno sanitario generará líquidos percolados, los cuales tienen características cualitativas de alto aporte contaminante fundamentalmente en términos de materia orgánica (DBO, DQO, SST), lo que obliga a efectuar el tratamiento correspondiente que permita su disposición final conforme la normativa vigente. De no ser así, los líquidos percolados crudos se constituirían en un factor de alto riesgo sanitario.

El inadecuado manejo y disposición final de los lixiviados, conforman una fuente importante de carga contaminante ya que al percolar a través del suelo, adquieren gran agilidad al llegar al nivel freático y puede contaminar el agua de los manantiales, las subterráneas, afectando la calidad fisicoquímica y bacteriológica del recurso hídrico, por las fisuras y otras fallas de las

rocas y suelos impermeables, a la vez de causar un efecto negativo en el deterioro paisajístico, se afecta el ciclo bioquímico y la función de biofiltro, alteración de las actividades de los microorganismos y diversidad del suelo, aumenta la vulnerabilidad de degradación del suelo influyendo en la alteración del nivel de resiliencia.

Es allí, donde surge la necesidad de establecer un tratamiento y disposición final a los lixiviados.

Para el caso específico del relleno sanitario de Barranquilla, se calcula que de las 22'181, 086.50 toneladas (capacidad de diseño) de desechos se habrá generado, en un lapso de 30 años, 2'839,493.9 m<sup>3</sup> de lixiviados, durante la fase operativa y proceso de post clausura.

Al final del proceso de tratamiento de los lixiviados tratados generados, no existe una disposición final eficiente que aminore la ocurrencia de este posible problema de contaminación ambiental, lo anterior dado que actualmente luego del proceso de tratamiento fisicoquímico del lixiviado, este se almacena en una laguna cuya capacidad se ve limitada por la continua generación del mismo proveniente de la masa de residuo en los vasos activos, y las normas de vertimiento del afluente con tales características, suponen una alta inversión para la conducción del mismo hasta un sistema de recepción teniendo en cuenta la ubicación del relleno, retirado de cuerpos de agua y/o sistemas de alcantarillado; De otra parte teniendo un líquido con características contaminantes del ambiente lo cual lo hace no viable para vertimiento en las zona boscosa que rodea las instalaciones del relleno, dejando como única opción hasta el momento, la recirculación del mismo sobre los vasos de disposición ya clausurados. Por lo anterior descrito, se plantea nuestro problema con el manejo y disposición final de los volúmenes de lixiviado tratado.

### **1.1. Formulación del Problema.**

---

Considerando la problemática antes mencionada, se plantea la siguiente interrogante:  
¿Cuál es el manejo adecuado y disposición final del lixiviado tratado en los rellenos sanitarios?

### **2. Justificación e Importancia de la Investigación**

---

Uno de los principales impactos ambientales relacionados con la gestión de residuos sólidos en un relleno sanitario, es la generación de lixiviados o líquidos percolados de la masa de residuos por degradación de la materia.

La correcta gestión de los lixiviados generados en un relleno sanitario es de gran importancia para evitar la contaminación de las aguas y los graves problemas medioambientales; el origen del lixiviado producido en un relleno sanitario se atribuye a muchos factores incluyendo desde cualquier fuente de entrada (precipitación, escorrentía, agua superficial o subterránea etc.) hasta el líquido producido en la descomposición de los residuos.

En un relleno como en todo sistema, se producen tanto entradas o aportes de agua como salidas o pérdidas. El balance resultante tras considerar los aportes menos las pérdidas se va añadiendo a la humedad almacenada en el material de cubrimiento de los residuos; cuando esta humedad excede la capacidad de campo (máxima cantidad de humedad que puede retener sin que se produzca percolación continua por gravedad), comienza a percolar hacia los residuos; los residuos van reteniendo esa humedad hasta que se saturan, alcanzando su capacidad de campo, la descomposición anaeróbica rápidamente comienza a actuar sobre la masa de residuos, produciendo cambios en la materia orgánica, primero de sólidos a líquidos y luego de líquido a gas, pero es la fase de licuefacción la que ayuda a incrementar el volumen de líquidos en el relleno y a la vez su potencial contaminante y es allí cuando la humedad procedente de los residuos comienza a emerger

como lixiviado por los sistemas de conducción instalados en el fondo de cada vaso de disposición y que conducen los grandes volúmenes líquidos hacia las lagunas de retención para su tratamiento y disposición final; estos para ser manejados en forma apropiada y amigable con el ambiente requieren de un proceso de tratamiento y disposición eficiente; por lo que se plantea el diseño para su control y eliminación por método de aspersión y evaporación.

Teniendo en cuenta que en la actualidad en el relleno sanitario no se contempla el vertimiento de lixiviados tratados a cuerpos de agua superficial o redes de alcantarillado y en aras de continuar evitando el impacto que esto genera por la carga contaminante, se propone una mejora en el sistema y/o procesos de disposición final de estos líquidos con el diseño de un sistema de aspersión sobre los vasos que se encuentran ya clausurados y otros en proceso de cierre, donde se podrá por efectos de las condiciones ambientales, evaporar el mismo; debido a la capacidad impermeable del material de cubrimiento que se utiliza en las celdas de disposición para control de olores y de impacto visual (arcilla), se manejarán las posibles escorrentías del proceso hacia las chimeneas de tal forma que este pueda ser conducido nuevamente a las lagunas y recirculara entonces de acuerdo al tiempo de retención, proceso que dará como beneficio la humectación permanente de la masa de residuos favoreciendo el proceso de degradación.

Con el sistema de aspersión se plantea la mejora en el proceso de eliminación del lixiviado previamente tratado generando menor impacto al ambiente por medio de la evaporación natural otorgando mayor capacidad de recepción de líquidos en las lagunas de tratamiento y ofreciendo alternativas amigables con el ambiente para la disposición final del mismo, dado que será instalado en vasos en sus etapas de clausura y semi clausurados, utilizando áreas abiertas para tal fin y dando solución a la problemática del vertimiento o disposición final de la generación diaria proveniente de los vasos que en la actualidad operan en el relleno sanitario.

### **3. Objetivo de la investigación**

#### **3.1.Objetivo General.**

---

Diseñar un sistema que optimice el proceso de disposición final de lixiviado tratado en el relleno sanitario de la ciudad de Barranquilla.

#### **3.2.Objetivos específicos.**

- 
- ✓ Identificar la cantidad promedio de lixiviado que está siendo tratado por la planta para posterior manejo y/o disposición final.
  - ✓ Cuantificar la capacidad de evaporación por aspersión teniendo en cuenta tasas de evaporación a partir de datos meteorológicos.
  - ✓ Entregar recomendaciones de un diseño del sistema de evaporación para darle disposición final a los lixiviados tratados.

### **4. Delimitación de la Investigación**

---

La presente investigación se orientó al estudio del lixiviado y el manejo que se le da a este en el relleno sanitario de la ciudad de Barranquilla.

La misma se desarrolló en el período comprendido desde diciembre de 2017 a julio de 2018.

En relación al contenido, el estudio se circunscribió a la normatividad contenida en el Decreto 1784 del 2 de noviembre de 2017, que es una modificación y adición al decreto 1077 de 2015, enmarcada en la línea de investigación del tratamiento y la disposición final de los lixiviados. Donde se consultaron las bases legales que fundamentan este proceso.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

---

El propósito del presente capítulo es lograr la coordinación, así como la coherencia en cuanto a conceptos, proposiciones e inquietudes de investigadores y estudios de las variables que ocupan este estudio, lo que proporciona la incorporación a este tema a su contextualización.

#### **1. Antecedentes de la investigación.**

---

A continuación se describen varias investigaciones relacionadas con la variable a estudiar, tal como el impacto ambiental; dichos antecedentes se presentan estructurados en orden cronológico, con el objetivo de que sirvan de base a los contenidos investigados, debido a la construcción en estudios previos relevantes para hacer un aporte a esta investigación.

En consecuencia ( BUSTOS CASTRO, 2018), En su proyecto de investigación presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Ambiental y Sanitaria titulado “*Uso del Óxido de Grafeno como Floculante para el Tratamiento en el Lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana*” en la Universidad de la Salle, Bogotá-2018, plantea que las características del lixiviado cuando ingresa a la planta dependen directamente de la zona de la que provenga, dependiendo del tamaño de la zona y del tipo de residuo que se deposite allí; lo cual determina la calidad del lixiviado. Las zonas nuevas poseen mayores concentraciones, igualmente dependiendo de la ruta interna de transito también habrá variación en las concentraciones.

Para realizar la proyección de lixiviados del Relleno Sanitario Doña Juana se realiza un proceso de modelación predictivo para la fase I de optimización de las zonas VII y VIII y de igual forma el modelo también estima la producción de lixiviados en la fase II que son los lixiviados que se generan en las zonas clausuradas; su propósito es tener consideraciones técnicas necesarias

para el dimensionamiento de los sistemas de recolección, conducción y tratamiento de los lixiviados al igual que de la operación y el mantenimiento de las áreas en las fases posteriores.

En este momento el sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana cuenta con la implementación de los componentes como el transporte del lixiviado desde la zona de disposición de residuos por medio de líneas de conducción de lixiviado, estructuras de regulación y almacenamiento como los pondajes y un sistema de depuración biológica denominados SBR y planta de tratamiento de lixiviados. Generalmente la evacuación de lixiviado se hace por tubería de polietileno de 12 o 14 pulgadas con una, dos o tres líneas según la terraza que le corresponda debido a que las zonas del terreno se encuentran divididas por varias terrazas que se encuentran conectadas a una conducción principal de lixiviado cuya tubería está entre 14 y 16 pulgadas y que a su vez cuenta con una sección construida en polietileno; existe otra conducción que es un canal construido en concreto revestido en geomembrana por donde se conduce otra parte del lixiviado y luego vuelve y se conecta de nuevo a la tubería principal. El sistema de tratamiento de Doña Juana actualmente se compone de tres procesos unitario que son el proceso fisicoquímico, el proceso biológico aerobio y el Proceso biológico de desnitrificación.

Teniendo en cuenta el porcentaje de remoción que obtuvo con el óxido de grafeno Bustos Castro pudo concluir que este era muy cercano al que se obtiene utilizando el PAC. Pero de aplicarse una dosis más alta de óxido de grafeno los resultados en la remoción de materia orgánica medida como DQO serían mejores. A pesar de esto la alternativa no es viable aun cuando se incremente la eficiencia del óxido del grafeno pues se incurren en costos muy elevados; para que el óxido del grafeno sea una alternativa viable tendría que usarse una dosificación aproximada de 120 mL/L lo cual implica que las unidades de 67 tratamiento fisicoquímico deberían tener la capacidad de soportar el volumen que aumenta con la aplicación del óxido de grafeno.



Dentro de este contexto, (Carrillo & Anrango Pavón , 2018) realizó la investigación: *Métodos alternativos para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del Cantón Mejía, Pichincha, Ecuador -2018*, en la Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales de Quito- Ecuador, en ella resalta la variabilidad de compuestos que tiene un lixiviado, expone que resulta complicado el proponer solo un tratamiento sea este químico, físico o biológico para reducir la carga contaminante; considera el proceso de oxidación avanzada (reacción fenton) como el más efectivo; dicho proceso consiste en la reacción fenton que se produce en el lixiviado al mezclar peróxido de hidrógeno grado reactivo ( $H_2O_2$ ) y sulfato de hierro heptahidratado ( $Fe SO_4 \cdot 7 H_2O$ ) como catalizador de la reacción; el proceso muestra inconvenientes en cuanto al empleo de grandes cantidades de catalizador, lo que supone la generación de lodos al momento de la implementación a escala industrial; sin embargo estas limitaciones podrían ser superadas a través de la aplicación de híbridos.

Otro de los tratamientos que explica es el proceso de coagulación - floculación este se basa en desestabilizar los sólidos suspendidos presentes en el lixiviado para causar la aglomeración y posterior decantación, obteniendo de esta manera un líquido clarificado; el rendimiento de este proceso es considerado poco eficiente debido a que la concentración de sólidos suspendidos involucrados en el proceso es baja.

Por otra parte (Consultoría y Dirección de Proyectos s.a.s, 2017), realiza un informe final a la alcaldía municipal de Girardot-Cundinamarca titulado : *Contrato N° 1016 de 2016 Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de Girardot -2017*, en donde se hace referencia al relleno sanitario parque Ecológico praderas del magdalena, se encuentra ubicado a 13.5 km en la vía Girardot Nariño; en el informe con relación al tratamiento de los lixiviados se manifestó que el manejo de lixiviados se hace por evaporación y aspersión

con una generación de aproximadamente 1.5lts/seg; la recolección y manejo se realiza mediante filtros con tubería de 6” instalados en las patas de las terrazas localizados en la parte baja de cada una de las terrazas, conduciendo el lixiviado hasta un foso de recolección, donde se bombea hasta un pondaje de almacenamiento y evaporación; Estas lagunas están forradas por una capa de 0.50 m de espesor de arcilla y material sintético o geotextil con un espesor de 1.5 mm con la finalidad de evitar fugas y contaminación de acuíferos. El lixiviado recircula hacia la masa de residuos por micro aspersión y evaporación.

Para la prestación del servicio de recolección y transporte de residuos en área urbana los vehículos de recolección deben tener una compactación cerrada que impida la salida de líquidos lixiviados conforme a las características de los vehículos de recolección y transporte de residuos sólidos establecidos en el Decreto 1077/2015.

Esto permite concluir, que No se realiza vertimiento de lixiviados, el manejo se hace por evaporación y recirculación por micro aspersión; Por medio de la implementación de los sistemas de control y tratamiento dado a los lixiviados y debido a la impermeabilización del fondo de los vasos se garantiza que no se está realizando ningún vertimiento directo a las fuentes de agua superficiales ni contaminación de aguas subterráneas y teniendo en cuenta que el total del lixiviado generado en el relleno sanitario es en promedio de 3.126,54 m<sup>3</sup>/mes, siendo evaporado un promedio de 64.73 mm/mes (año 2016).

En el mismo sentido, (Vicente Alarcón, 2012), ejecuto un estudio llamado “*Optimización del proceso de evaporación de lixiviados en el relleno sanitario Santiago Poniente*”-2012: basado en un estudio previo realizado propusieron un sistema de tratamiento de lixiviados mediante evaporación natural que se encuentra formado por evaporación estática y evaporación dinámica.

El manejo de lixiviados mediante evaporación estática consiste principalmente en espejos de lixiviado sin la inducción mecánica de movimiento, los cuales al interactuar con las variables meteorológicas logran evaporar lixiviado. Para dar tratamiento del lixiviado por evaporación estática una de las propuestas presentadas por Vicente Alarcón son Bandejas de evaporación que consisten en unidades pequeñas de aproximadamente 100 m<sup>2</sup> de superficie expuesta, las cuales se sitúan sobre la masa de residuos. Las bandejas deberán ser construidas a base de PVC de color negro de manera de aumentar la eficiencia de evaporación; La altura de lixiviado al interior de las bandejas debe ser la menor altura posible, las bandejas de evaporación no cumplen función de almacenamiento. Las bandejas son de carácter estacional es decir una vez terminado el periodo de evaporación se desarman y se guardan. Estas bandejas tienen formas planas y trapezoidales las cuales mantienen el lixiviado a una profundidad de 15 a 40 cm independientes entre sí.

Donde se realiza el manejo del lixiviado a través de la evaporación, logrando la eliminación de 40.000 m<sup>3</sup> de lixiviado, equivalente al 60% del lixiviado generado en un año normal de operación, teniendo en cuenta que el relleno sanitario Santiago Poniente siendo uno de los rellenos más grande de la ciudad de Santiago en Chile el cual, recibe las 40.000 ton/mes.

El sistema de tratamiento de lixiviados comprende las etapas de minimizar la generación de lixiviado, captar y Conducir lixiviado hacia 6 piscinas de almacenamiento, derivar lixiviado desde las piscinas de almacenamiento a 5 bandejas de evaporación, tratamiento externo en plantas de tratamiento de aguas servidas y disposición de lodos producto de la evaporación, en el sector de disposición de residuos.

Este sistema presenta excelentes resultados debido a lo económico, no utiliza insumos químicos evitando la generación de gases invernadero y menos residuos excedentes (lodos) lo que lo hace amigable con el medio ambiente.

(Romero Batallán, 2010), expone en su tesis doctoral para la Universidad de Salamanca en España titulada: *Aprovechamiento Integral de Lixiviados-2010*, que para que estos puedan ser aprovechados por medio de la evaporación forzada se utilizan paneles evaporadores atmosféricos con el propósito de retirar el agua y humedad presente en el lixiviado hasta volverlo un lodo inerte con un volumen alrededor del 7%. El módulo de evaporación es una estructura con dos secciones, el área de bombeo se encuentra cerca de la estructura y junto a ella se sitúa el depósito de agua del lavado con la bomba para el mantenimiento y limpieza de los paneles de retención; en otra estructura se ubican el depósito de control y el foso de la bomba de recirculación la cual envía el lixiviado hacia los paneles para su respectiva evaporación.

Las variables climatológicas de importancia para que suceda el proceso de evaporación son la temperatura anual media de 17°C y una humedad relativa máxima del 75%. Otras variables en consideración son los parámetros de sólidos totales que determina la cantidad de agua que puede evaporarse, las características de los sólidos los cuales determinan el límite de concentración del lodo y por ende el límite de evaporación. Esta técnica de evaporación permite obtener la reducción de hasta el 98% del volumen original, quedando el 2% restante en forma de un residuo sólido que se dispone en las celdas ordinarias.

Desde otro punto de vista, (Corena Luna, 2010), realizó la investigación titulada *“sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios”2010*, para la universidad de Sucre; este estudio se basa sobre el manejo de lixiviados que se encuentran en el relleno sanitario el oasis en la Ciudad de Sincelejo-Sucre, se encuentra conformado por 29.86 Ha, y luego de 7 años se clausuró la primera etapa.

El lixiviado generado en el relleno sanitario es de 0.03 l/s, y este aumenta a 0.15 l/s en época de lluvias. En el relleno se efectúa la recirculación de los lixiviados aprovechando la

temperatura promedio de la región que oscila entre 30° a 40 °C, este proceso es realizado diariamente en el periodo comprendido entre las 10:00 a las 16:00 horas momento en que se aprovecha la mayor cantidad de brillo solar.

El proceso de recirculación del lixiviado es realizado con una pequeña bomba de 5 caballos para la recirculación de 189 litros por minuto a través de una manguera de polietileno de 2” para finalmente conectarse a 10 aspersores cubriendo un radio de 20 m. Los objetivos de la recirculación es la de contribuir a la disminución del volumen del lixiviado a través de la evaporación y la aceleración de la degradación de los residuos sólidos; Si los lodos productos de la sedimentación de los lixiviados no se secan totalmente se les adiciona cal para que estos se solidifiquen rápidamente, estos lodos son usados para compostaje interno en el relleno y si son altamente contaminantes son devueltos a las celdas del relleno los cuales son expandidos por un buldócer para nuevamente integrarlos al medio natural.

De igual manera (Arbeláez Mesa & García Sierra, 2010) en su estudio realizado que lleva por nombre *Estudio De Las Tecnologías Empleadas Para El Manejo De Lixiviados Y Su Aplicabilidad En El Medio-2010*, para la universidad de EAFIT en Medellín, considera la recirculación como una alternativa para el tratamiento de los lixiviados, en el cual se aprovecha el relleno o la misma masa de residuos sólidos como un filtro sin presencia de oxígeno o anaerobio, transformando los ácidos grasos del lixiviado a gas metano. Produciéndose el aumento de humedad en el relleno que igualmente contribuye a la producción de metano; por otro lado, el pH aumenta conllevando a la disminución de los metales en suspensión presentes en el lixiviado.

De acuerdo a los distintos planteamientos anteriormente mencionados podríamos concluir que el tratamiento y manejo de los lixiviados es variante, que resultaría difícil presentar solo una forma de tratamiento para este material debido a los distintos tratamientos que se les puede dar

como son la oxidación avanzada, la coagulación – floculación, la oxidación con Grafeno, evaporación y aspersión, la evaporación estática , evaporación dinámica, así como la evaporación forzada o la recirculación del material lixiviado. Cada una de las formas de tratamiento mencionadas busca disminuir el material lixiviado dentro de los rellenos sanitarios, las condiciones climatológicas y la ubicación del terreno donde se encuentre el relleno sanitario son factores que afectan tanto la formación de este material como el tratamiento del mismo; para el tratamiento del material lixiviado estos depósitos se encuentran formados bien sea por líneas de conducción de residuos o tuberías que se encuentran conectadas a terrazas hasta donde llega el lixiviado.

Algunas de estas propuestas resultan ser más rentables que otras en cuanto al tema económico, pero todas estas deben de estar reguladas regulado bajo el cumplimiento de normativas y decretos con el fin de evitar contaminaciones en el medio ambiente.

## **2. Bases Teóricas**

---

En toda investigación las bases teóricas son el pilar para sustentar el conocimiento, conjuntamente involucrar todos aquellos elementos, así como las situaciones incluidas en dicho estudio. Bajo este contexto, las bases teóricas de esta investigación se enmarcaran en todo lo relacionado con el manejo y disposición de los residuos sólidos; su posterior tratamiento para el material lixiviado y su reutilización. De este modo, a continuación se presenta la siguiente información.

### **2.1. Residuos Sólidos**

Los residuos sólidos son aquellos materiales desechados tras su vida útil y que ya no cuentan con un valor económico. Están formados por lo general de materia que es utilizada en la fabricación, transformación o utilización de los bienes de consumo. (Inforeciclaje, 2011).

**2.1.1. Manejo y disposición de los residuos sólidos.** Hoy en día la producción de residuos sólidos y su tratamiento inadecuado hacen parte de los grandes problemas ambientales y de salud, los cuales han aumentado en los últimos años gracias al aumento de la población y a los esquemas de producción y consumo. La basura como también son conocidos los residuos sólidos, muestra una desagradable imagen en los campos y las ciudades, contaminan el suelo, el agua, el aire y para su aislamiento ocupan grandes espacios. (Universidad Pontificia Bolivariana , 2016).

El manejo y disposición de los residuos sólidos es un tema de interés general dada la importancia que posee a nivel de afectación a la salud y al medio ambiente. Sin embargo, la ejecución irresponsable de nuestras actividades antropogénicas, debilitan la capacidad de resiliencia que posee la naturaleza generando una serie de impactos negativos sobre los recursos naturales.

Los residuos sólidos como resultante de todas nuestras actividades representan en su manejo, un grado de importancia vital para nuestra calidad de vida y la calidad de nuestro entorno. Nuestro accionar contra los recursos naturales, debe ser analizado y evaluado para identificar opciones de mejora, en el marco del manejo de los residuos sólidos y su disposición final.

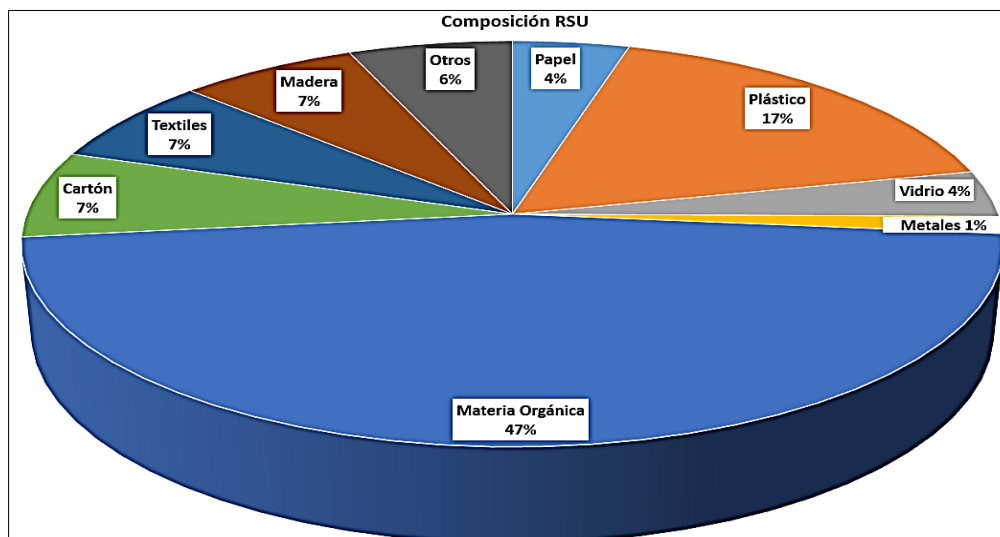
Para disminuir el riesgo para la salud y el medio ambiente, referente al tema de residuos sólidos, es indispensable crear sistemas y tecnologías que sean idóneas para el tratamiento y disposición final de nuestros residuos. Las técnicas y el sistema utilizado dependerán del tipo de residuo, fuente donde se genera y sus características ya sean físicas, químicas o biológicas.

**2.1.1.1 Composición de los RSU.** Los valores de cada componente de los residuos sólidos urbanos son expresados en (%) en masa, base húmeda, materia orgánica, papel, cartón, plástico, textiles, metales, vidrio, escombros etc. De acuerdo a la composición de los RSU se

implementarán estudios de factibilidad de reciclaje, investigación, manejo, aprovechamiento, manejo y disposición final (UNED).

Figura 1

*Composición de los residuos sólidos urbanos en el año 2017.*



Fuente: Triple A S.A. E.S.P. (2017).

La descomposición de los residuos sólidos genera un líquido, con alta concentración orgánica denominado lixiviado; es de color oscuro, comúnmente de mal olor y es contaminante de aguas subterráneas y superficiales. Por lo tanto, se debe mantener alejado de todo cuerpo de agua.

Los lixiviados son considerados aguas residuales con características especiales que se generan por la percolación del agua a través de las capas de residuos sólidos y que se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica e inorgánica, grasas, aceites y metales pesados, estos son considerados altamente contaminantes. La producción de lixiviados se puede prevenir manteniendo los líquidos fuera de los residuos sólidos y con un adecuado manejo del agua lluvia.

La dificultad de su tratamiento radica en los grupos contaminantes que posee: materia orgánica, patógenos, nutrientes y sustancias tóxicas. Razón por lo cual, la selección del



tratamiento a utilizar para remover alguno de estos grupos se ve limitado por la presencia de otro grupo contaminante como por ejemplo; la remoción de la materia orgánica y los metales pesados. (Giraldo , 2001).

Los datos que se presentan en la siguiente tabla son representativos de los oligocompuestos encontrados de acuerdo a un análisis realizado a residuos sólidos urbanos de sesenta y seis vertederos, teniendo en cuenta que las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COV) dependerán del tiempo de antigüedad de los vertederos.

Tabla 1.

*Concentraciones típicas de compuestos en cantidades trazas encontradas en el gas de 66 vertederos RSU (EPA).*

<b>COMPUESTO</b>	<b>CONCENTRACIÓN (ppbV)</b>		
	<b>Mediana</b>	<b>Media</b>	<b>Máxima</b>
Acetona	0	6838	240000
Benceno	932	2075	39000
Clorobenceno	0	82	1640
Cloroformo	0	245	12000
1,1 – Dicloroetano	0	2801	36000
Diclorometano	1150	25694	620000
1, 1 – Dicloroetano	0	130	4000
Clorodietileno	0	2635	20000
Tras – 1,2 - Dicloroetano	0	36	850

2,3 - Dicloropropano	0	0	0
1,2 - Dicloropropano	0	0	0
Bromuro de Etileno	0	0	0
Dicloroetileno	0	59	2100
Óxido de etileno	0	0	0
Etilbenceno	0	7334	87500
Metil – etil – cetona	0	3092	130000
1, 1, 2 Tricloroetano	0	0	0
1, 1, 1 - Tricloroetano	0	615	14500
Tricloroetileno	0	2079	32000
Tolueno	8125	34907	280000
1, 1, 2, 2 – Tetracloroetano	0	246	16000
Tetracloroetileno	260	5244	180000
Cloruro de vinilo	1150	3508	32000
Estirenos	0	1517	87000
Acetato de vinilo	0	5663	240000
Xileno	0	2651	38000

*Nota.* ppbV= partes por billón (mil millones) por volumen.

Fuente: Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. (1997).

El correcto manejo de los residuos sólidos suele tener sus dificultades debido al desconocimiento de información de sus compuestos y de lo que ellos pueden generar (lixiviados, gases); (Ocampo Barrero & Londoño Carvajal, 2016-1) refiere que el relleno sanitario La Esmeralda ubicado en la ciudad de Bogotá genera un promedio de 2.16 L/s de lixiviados en

invierno y 0.98 L/s en verano, los cuales son tratados en un sistema biológico anaerobio, compuesto por un tanque homogeneizador y dos reactores anaerobios de manto lodo de flujo ascendente conocidos como UASB (upflow anaerobic sludge blanket). Las muestras tomadas para la caracterización y determinación del coeficiente de partición se tomaron a la salida del sistema de tratamiento anaerobio UASB teniendo la precaución de no airearlas y conservar las condiciones anaerobias, luego fueron llevadas al laboratorio para el análisis y los resultados de la caracterización físico-química se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.

*Características fisicoquímicas de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda.*

<i>Parámetro</i>	<i>Rango encontrado en el lixiviado</i>
pH	8.03 - 8.50
Color (U. Pt-Co)	204.9 - 2141
Turbiedad (NTU)	259 - 347
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	13650 - 18560
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	4659 - 10880
DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	1365 - 3150
SST (mg/L)	442 - 1310
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	12800 - 21646
Hg total ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	71.40 - 1336.80

Fuente: Ocampo M., Londoño A., Giraldo G., Sanabria N., (2016).

## 2.2. Rellenos Sanitarios

Un relleno, es una técnica de eliminación y disposición final de residuos sólidos en el suelo que tiene como objetivo disminuir los impactos sobre la comunidad, así como evitar riesgos para

la salud tanto en la etapa de su operación como después de terminado o clausurado. La técnica se basa en el principio de compactar la basura en capas cubriendo cada capa con material adecuado conforme avanza la operación. El relleno sanitario es un método completo y definitivo para la eliminación de todo tipo de desechos sólidos, dentro de sus ventajas tenemos podemos mencionar el que evita los problemas de cenizas y de materiales que no se descomponen, asequible en tema de costos de operación y mantenimiento debido a que resulta económico, factible y adecuado para la disposición de nuestros residuos, siempre y cuando se respeten los diseños de ingeniería acordes con la normatividad vigente; generación de empleo para mano de obra no calificada de la comunidad en la zona de influencia, puede adaptarse su ubicación cerca del área urbana, reducción de costos por transporte, reutilización del área intervenida para zona de parques y juegos.

Se deben implementar medidas para el manejo, control y la mitigación de los impactos generados por el proyecto, desde el tratamiento de los lixiviados, hasta la quema del Biogás MDL mecanismos de desarrollo limpio, compensación forestal, proyecto de reverdecimiento de las áreas intervenidas etc.

Según el Decreto No. 838 del 23 de marzo de 2005, La técnica se basa en principios de ingeniería, para aislamiento, compactación y cubrimiento terreo o temporal de los residuos con la finalidad del control de lixiviados conforme avanza la operación.

El lixiviado de los rellenos sanitarios urbanos es una compleja combinación de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas que generan impactos ambientales negativos al medio ambiente, debido a su alta concentración de materia orgánica recalcitrante y la toxicidad. (Moraes da Costa, Alves Daflon, Maia Bila, da Fonseca, & Carbonelli Campos, 2018). Dado esto, la descarga de lixiviado se convierte en uno de los principales problemas que genera un relleno sanitario por su contacto con el manto freático o fuentes de aguas superficiales.

En forma general, Barranquilla y los municipios del área metropolitana, realizan la disposición final de sus residuos en 2 rellenos, reflejados en orden de importancia; El relleno sanitario del municipio de Soledad, cuyas instalaciones empezaron a recibir desde el año de 1992 con la dirección de INGSA los RSU del municipio, durante un tiempo presento problemas en su operación para el manejo adecuado y disposición final de los residuos, convirtiéndose en un botadero a cielo abierto. Por tal motivo en el año 2001, ingresa la empresa Aseo confiable S.A ESP reacondicionando el área y retomar la disposición final de los residuos bajo la línea de relleno sanitario hasta el año 2008.

En el año 2009 a 15 kilómetros de Barranquilla en la vía Juan Mina-Tubará empezó a funcionar el relleno Sanitario Parque Ambiental los Pocitos, el cual cuenta con 75 hectáreas para la disposición de desechos sólidos; el terreno se acondicionó para dicha disposición por medio de un material sintético impermeable, para evitar que los lixiviados, contaminen las aguas subterráneas (Triple A S.A. E.S.P. Barranquilla, 2018).

El relleno sanitario de la ciudad de Barranquilla, está ubicado entre uno de los mejores de Latinoamérica debido a su compromiso socio ambiental y su labor amigablemente responsable con el manejo y disposición final de los residuos, con la finalidad de minimizar los riesgos asociados a su actividad sobre la salud pública y el medio ambiente.

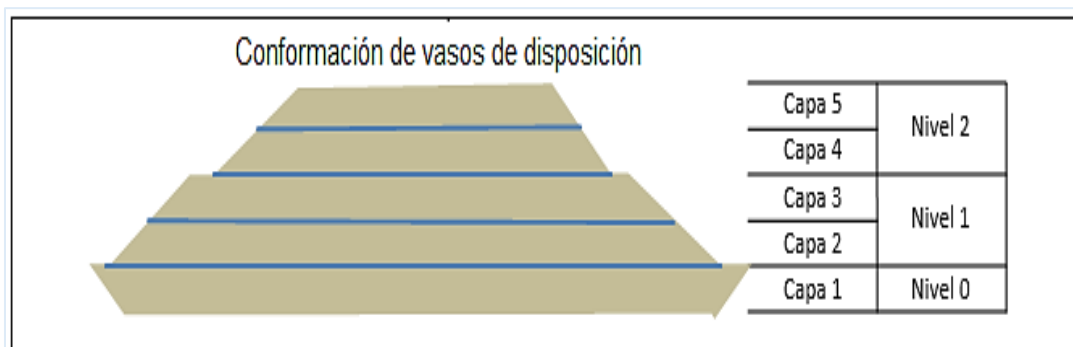
El método de operación del relleno sanitario, es el denominado área, el cual presenta la ventaja que se adapta a una infraestructura de impermeabilización de fondo y de drenaje de lixiviados.

Con base a la descomposición orgánica que se genera a medida que transcurre el tiempo y al sistema de evacuación de lixiviados, corresponde a su vez a un relleno anaeróbico de lecho con drenaje filtrante.

Es decir, la descomposición orgánica se realizaría de manera natural sin adición o presencia de oxígeno, drenando el lixiviado y fluidos percolados por la base del relleno con un sistema central de colección de lixiviados a gravedad de donde el lixiviado es conducido hacia su tratamiento. En la Figura 2 se observa el diseño o estructura de los vasos de disposición del relleno en estudio.

Figura 2

*Estructura Vasos de Disposición Relleno Sanitario.*



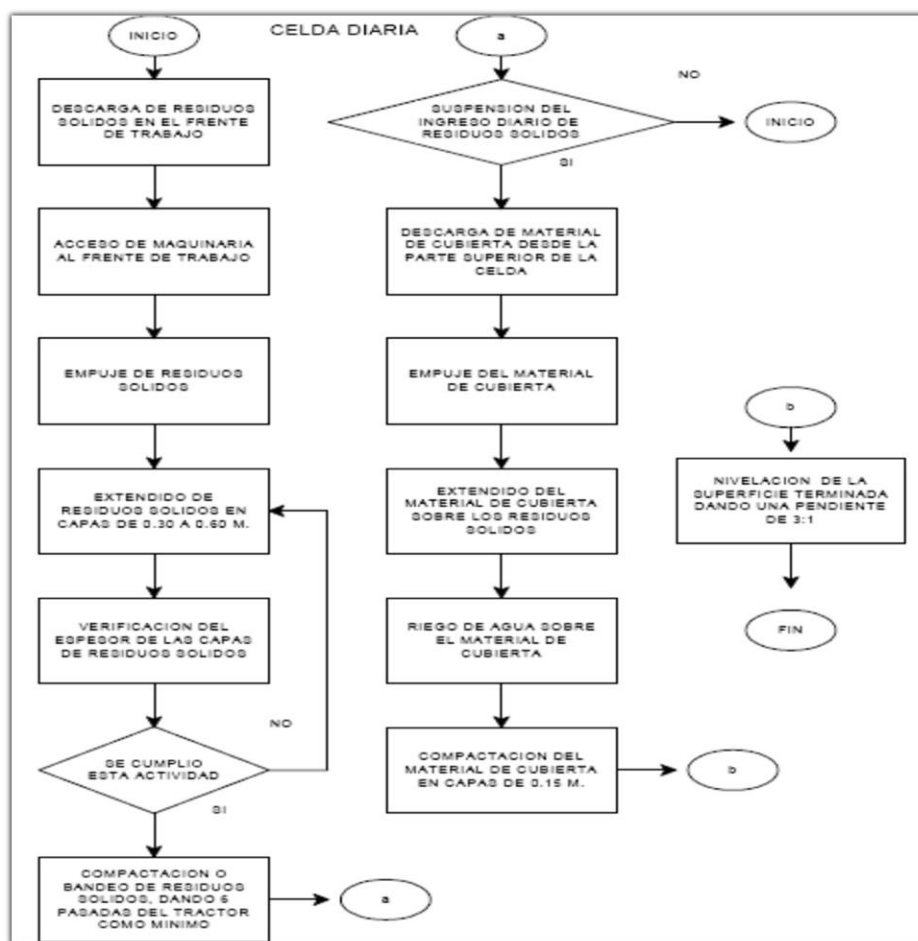
Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

La celda diaria constituye el elemento constructivo de primer orden en el relleno sanitario. En la Figura 3, se muestra la morfología de la celda diaria. Los residuos sólidos recibidos son esparcidos y compactados en capas dentro de un área perfectamente delimitada y hasta un volumen definido. Al término de cada día de operación, el área ya ocupada con residuos compactados, es cubierta completamente con una capa delgada de tierra o en su defecto con material sintético (cobertura negro-verde). De esta forma, los residuos compactados y cubiertos diariamente con este material, constituyen una celda. Una serie de celdas adyacentes en forma lateral o transversal

y con una misma altura forman la franja, luego Una serie de franjas adyacentes y con una misma altura conforman la capa. Las sucesiones de capas separadas por bermas conforman un nivel y uno o más niveles, forma el total una etapa del relleno sanitario.

Figura 3

*Proceso Operación Celda Diaria Disposición.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

El proyecto se desarrolla en un área de 116 Ha, 37 de la cuales se dedicarán a la preservación ambiental mientras las 75 Ha restantes hacen parte directa del proyecto con la

ubicación de obras tales como vías, adecuación de zonas de obtención de material de cobertura, adecuación de celdas para la disposición de residuos sólidos, lagunas de almacenamiento de lixiviados, tratamiento de lixiviados, báscula, oficinas, entre otros.

### **Tratamiento Actual del Lixiviado PTL**

---

En la actualidad la Planta de tratamiento físico químico de lixiviado (PTL) cuenta con tres sistemas que son:

**Sistema Preliminar:** Este sistema consiste en la eliminación de residuos sólidos de gran volumen y fácilmente separables preparando el lixiviado para la siguiente etapa. Por otro lado, se protegen los equipos mecánicos de daños e incrustaciones en las tuberías.

**Sistema Primario:** Consiste en la remoción de materia orgánica presente en los lixiviados, por medio de procesos biológicos dado en dos lagunas disminuyendo las altas cargas orgánicas presentes en el lixiviado.

**Sistema Secundario:** Este proceso propende la remoción de los sólidos, material no sedimentable, turbiedad, metales pesados provenientes del proceso primario, por medio de la adición de agentes coagulantes se inyectan los químicos en dosis necesarias para elevar la calidad del lixiviado tratado.

### **Tratamiento de Lixiviados**

---

(COGERSA, 2011) Afirma: “Uno de los grandes problemas que generan los vertederos son los líquidos que discurren a través de los residuos depositados y que rezuman desde o están contenido en ellos, es decir, los lixiviados”.



Las tecnologías de tratamiento son usadas para evitar la contaminación de recursos naturales por su generación, en el caso de los rellenos sanitarios dependerá de las características de cada relleno considerando factores como características del lixiviados, características de la descarga (si la hay), objetivo del tratamiento, costos, condiciones de mantenimiento.

Dentro de las técnicas más utilizadas para el tratamiento de lixiviado se encuentran:

### **2.3. Procesos anaerobios.**

Son uno de los tratamientos más usados para el tratamiento de los lixiviados ya que con el alto contenido de materia orgánica presente en estos, son procesos efectivos. Existen diferentes tecnologías con manejo de procesos anaerobias tales como: lagunas anaerobias, filtros, reactores UASB. Todo tratamiento posee desde diferentes puntos de vista ventajas y desventajas para ser aplicados. Entre las ventajas se dan que son sistemas simples, no producen muchos lodos, su operación es sencilla lo cual no requiere de personal especializado ni costos elevados.

Por otro lado, las desventajas que posee este proceso, se da en la afectación de la toxicidad del amoníaco y minerales disueltos que conllevan a incidir de forma negativa en la actividad microbiana. De igual manera, las precipitaciones y generación de material inorgánico dentro del sistema incurren en incrustaciones, taponamientos y limitaciones que influyen en la operatividad de los reactores.

### **2.4. Procesos aerobios.**

Tal como el proceso anaerobio, este utiliza sistemas como lagunas en línea con reactores biológicos con filtros con membrana. Es normalmente usado para incidir en la DBO y llevarla a bajas concentraciones. El costo /beneficio del proceso dependerá de la edad del lixiviado a tratar

ya que entre más viejo sea el lixiviado menor concentración tendrá, por tal razón muchas veces es usado como proceso auxiliar a sistemas anaerobios o en lixiviados de mediana o alta edad.

En cuanto a las desventajas se encuentra la generación excesiva de espuma y generación de lodos, precipitación de hierro. Debido a las complicaciones que se pueden presentar por estas características y la adición o necesidad de reguladores de carga y caudal este tipo de proceso a diferencia del anaerobio tiene un elevado costo de operación y mantenimiento.

## **2.5. Bioreactores con Membrana (MBR)**

La tecnología de Biorreactor de Membrana (MBR) se puede definir como la combinación de dos procesos; degradación biológica y separación por membrana, en uno único en el que los sólidos en suspensión y microorganismos responsables de la biodegradación son separados del agua tratada mediante una unidad de filtración por membrana. Por lo tanto, se distinguen dos partes principales que son la Unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos orgánicos y el Módulo de filtración encargado de llevar a cabo la separación física del licor mezcla. (YACUTEC, Mejora y Gestión de Vertidos S.L., S.F ).

De acuerdo a lo anterior los MBR es un complemento al proceso anaeróbico y aeróbico, que busca filtrar y separar los vertimientos con el fin de poder reutilizarlos. Se obtienen ventajas y desventajas simultáneamente tales como: reducción en los volúmenes del reactor pero complicaciones en la operación y mantenimiento de las membranas. Los MBR son muy eficientes en procesos biológicos para oxidación del amoníaco y remoción de DBO.

## **2.6. Osmosis Inversa**

Según la compañía (SEFILTRA S.A. , S.F )”La ósmosis inversa es una tecnología de purificación de agua mediante la cual se logra un elevado porcentaje de retención de contaminantes, disueltos y no disueltos (hasta un 99% de retención de sales disueltas)”.

Esta tecnología innovadora está siendo bastante implementada debido a su excelente rendimiento para la eliminación de los diferentes tipos de contaminantes presente en los lixiviados sobre todo en aquellos viejos o que presentan un pretratamiento ya que este sistema es efectivo en rangos de DBO bajas. Entre las ventajas tenemos que usan poca energía, además son respetuosos con el medio ambiente; entre sus desventajas encontramos que necesitan gran cantidad de agua y solo reembolsan hasta un 15 por ciento del agua y además el proceso de tratamiento es bastante demorado.

## **2.7. Proceso de evaporación y sus variables**

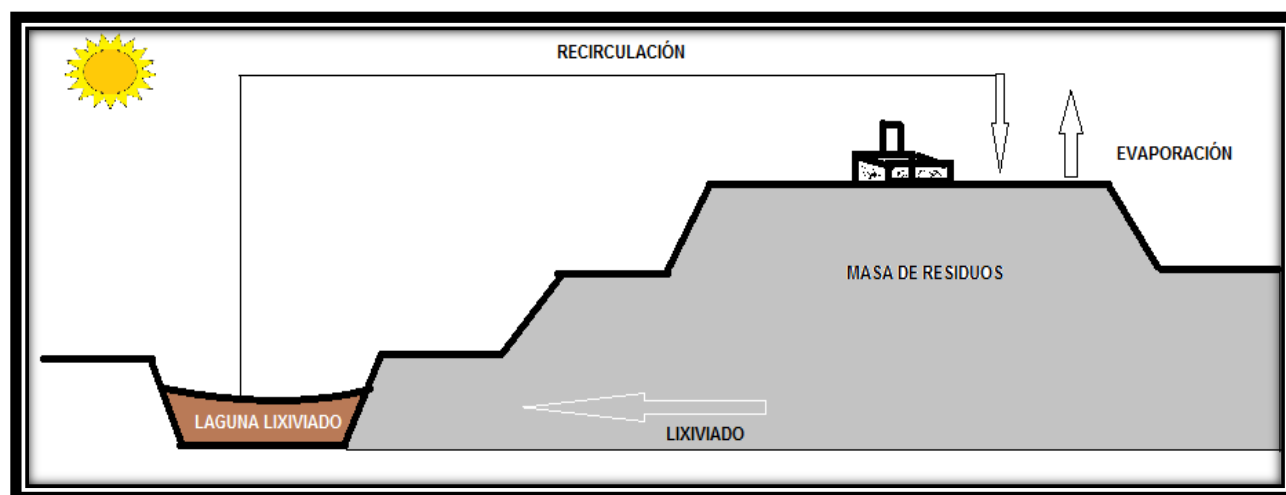
El sistema de evaporación de los lixiviados es una alternativa reciente que ha venido tomando fuerza en nuestro país, la eficacia de este sistema dependerá directamente de las condiciones climáticas de la región tales como: (Porcentaje de horas de iluminación solar anual, Temperatura). Por otro lado, se debe tener en cuenta el material de cobertura o gado de compactación que favorecerá el índice de impermeabilidad del terreno; ya que a menor impermeabilidad perdurara más tiempo sobre la superficie para poder evaporarse. También debe existir un manejo de escorrentías para evitar la contaminación de fuentes de aguas superficiales o subterráneas.

El lodo resultante del proceso puede ser dispuesto nuevamente en la celda como residuo ordinario, las ventajas de este proceso es lo simple de la tecnología y equipos y el bajo costo de inversión en referencia a otro tipo de tecnologías. Sin embargo, esta tecnología no debe ser

catalogada como una forma de tratamiento pues su objetivo principal es reducir la problemática principal en la operación de un relleno; el volumen de lixiviado más no realiza una depuración o tratamiento de los líquidos contaminantes. (Szantó Narea, Piraino Davidson, & Arancibia Evans, 2011).

Figura 1

*Proceso Evaporación Relleno.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

## Sistemas de aspersión

Un aspersor es un elemento mecánico el cual, normalmente recibe un flujo de agua a presión transformándolo en rocío con la finalidad de distribuir uniformemente el líquido sobre la superficie del terreno. Este proceso está sujeto a la evaporación cuando hace contacto con el ambiente.

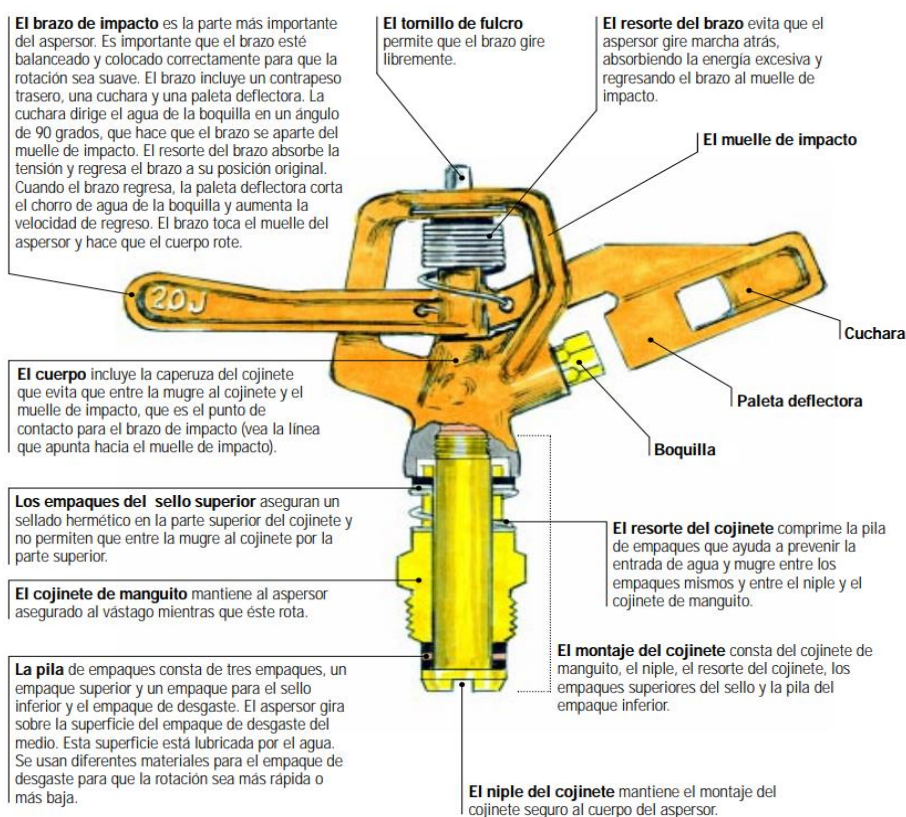
Este sistema es comúnmente utilizado en la rama de la agronomía, debido a sus ventajas como operación de bajo costo, bajo consumo energético, fácil mantenimiento y mínimo requerimiento de personal, es adaptable a diferentes dosis de riego, puede ser usado en terreno no nivelado, facilidad de automatización.

Como desventaja se pueden considerar: mantenimiento constante por obstrucción, riego heterogéneo por vientos, inversión inicial elevada.

Según el Ministerio de Agricultura, Pesca Alimentación y Medio Ambiente del gobierno de España, se deben de tener en cuenta los siguientes componentes para instalación de riego por aspersión, entre ellos encontramos la unidad o grupo de bombeo, las tuberías principales, los elementos de control y regulación, la tubería lateral o ramal de riego, los aspersores. Estos sistemas pueden ser de varios tipos; estacionarios o de desplazamiento continuo dependiendo de su aplicación.

Figura 8

*El Aspersor de Impacto.*



Fuente: Rain Bird. (2018).

### 3. MARCO CONCEPTUAL

---

#### **Aspersión**

---

Según ( Larousse Editorial, S.L., 2009) es el “Sistema de riego que reproduce las condiciones de la lluvia. El agua es repartida sobre el campo de cultivo por unos aspersores a los que llega mediante una red de tuberías”.

#### **Biodegradación**

---

De acuerdo con ( Larousse Editorial, S.L., 2009) es la “degradación molecular de una sustancia orgánica mediante la acción compleja de los organismos vivos, esp. Bacterias”.

#### **Biogás**

---

Según ( Definicion.DE, 2018) “Gas que se obtiene a partir de la descomposición de desechos de tipo orgánico por vía anaerobia (es decir, sin oxígeno). Este proceso es desarrollado por bacterias”.

#### **Carga Orgánica**

---

Desde la perspectiva de (El boletín de novedades de Jenck, 2013) es el “contenido de compuestos de carbono en un efluente, cualquiera sea su origen. Dichos compuestos de carbono son estructuras químicas (moléculas) donde el carbono está enlazado a hidrógeno y otros elementos como azufre, oxígeno, nitrógeno, fósforo y cloro, entre otros”.

## **Contaminante**

---

Para ( Laboratorio LCN, 2012) “son sustancias tóxicas que se acumulan en el organismo, impidiendo que se formen moléculas antioxidantes y antiinflamatorias, y produciendo moléculas prooxidantes y proinflamatorias”.

## **Disposición Final**

---

Según (Balderas Luna, S.F ) “acción de depósito permanente delos residuos sobre el suelo, en condiciones seguras, para evitar daños al ambiente”.

## **Drenaje**

---

De acuerdo con ( Definicion.DE, 2018) “Es el sistema de tuberías interconectadas que permite el desalojo de los líquidos pluviales o de otro tipo”.

## **Efluente**

---

Teniendo en cuenta lo expuesto por ( Definicion.DE, 2018) es un “fluido procedente de una instalación industrial”.

## **Evaporación**

---

Según ( Definicion.DE, 2018) “Es el proceso físico por medio del cual, se pasa una sustancia de su estado líquido a gaseoso, como consecuencia del aumento de temperatura ya sea de forma natural o artificial. Esta es una de las fases del ciclo del agua”.

## **Geomembrana**

---

De acuerdo con (Geomembranas de NUMA , 2013) “son un recubrimiento, una membrana o barrera de muy baja permeabilidad aplicada a la ingeniería geotécnica para controlar la migración de fluidos”.

## **Humedad**

---

Desde la perspectiva de ( Definicion.DE, 2018) “puede hacer mención al agua que se ha pegado a un objeto o que está vaporizada y combinada con el aire”.

## **Impactos Ambientales**

---

Para ( Definicion.DE, 2018) “es el efecto causado por una actividad humana sobre el medio ambiente”.

## **Infiltración**

---

Para ( Larousse Editorial, S.L., 2009) es la “Acumulación de líquido orgánico en algunos tejidos, esp. En el celular”.

## **Lixiviado**

---

Según ( BUSTOS CASTRO, 2018) “Es el líquido que se genera a partir de la descomposición bioquímica de los residuos al igual que la interacción de estos con el agua de escorrentía superficial a través de los desechos que se encuentran en proceso de biodegradación”.

## **Permeabilidad**

---

Según ( Larousse Editorial, S.L., 2009) es la “Propiedad física que tienen algunos terrenos y rocas de dejar filtrar a través de ellos líquidos o gases”.



### **Planta de tratamiento (EDAR)**

---

Para (Santamarta Calleja & Rodríguez Pena, S.F) “Las EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) son plantas dedicadas a la depuración de aguas residuales cuya función básica es recoger las aguas de una población o industria, y después de reducir la contaminación mediante ciertos tratamientos y procesos, la devuelve a un cauce receptor como un río, embalse, mar”.

### **Relleno Sanitario**

---

Basado en ( Definicion.DE, 2018) se dice que es el “espacio donde se depositan los residuos sólidos de una ciudad después de haber recibido determinados tratamientos. Para impedir que se contamine el subsuelo, se impermeabiliza el terreno con polietileno de alta densidad u otra sustancia y se coloca arcilla”.

### **Residuos Sólidos**

---

De acuerdo con ( Definicion.DE, 2018) “son aquellos desechos que están en el mencionado estado”.

### **Revegetalización**

---

(Velasquez, 2013) Considera que son los “procesos por el cual diferentes tipos de plantas se utilizan en un área determinada en la cual ha sido removida su cobertura vegetal original por causas naturales o antrópicas”.

## **4. MARCO CONTEXTUAL**

---

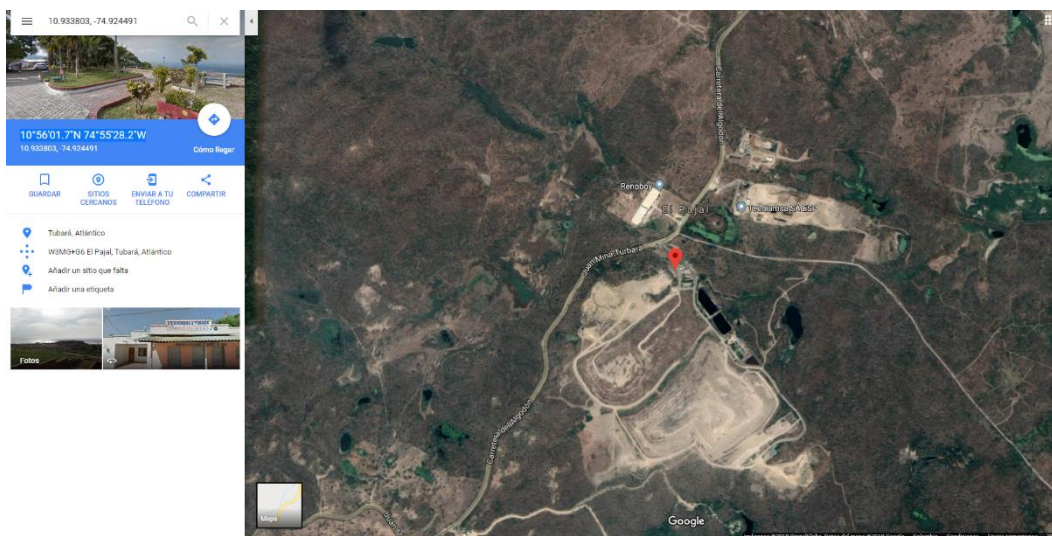
### **4.1. Localización Externa**

El relleno sanitario los pocitos se encuentra localizado a 13 kilómetros de la capital del Atlántico, en la vía que conduce hacia el municipio de Tubará. (Ubicada su extensión territorial

en un 65% en el Municipio de Tubará y un 35 % en el Municipio de Galapa). En las coordenadas N 10° 56' 01 7", WO 74° 55' 28 2".

Figura 2

*Plano Externo Relleno Sanitario Barranquilla.*



Fuente: Google Maps (2018)

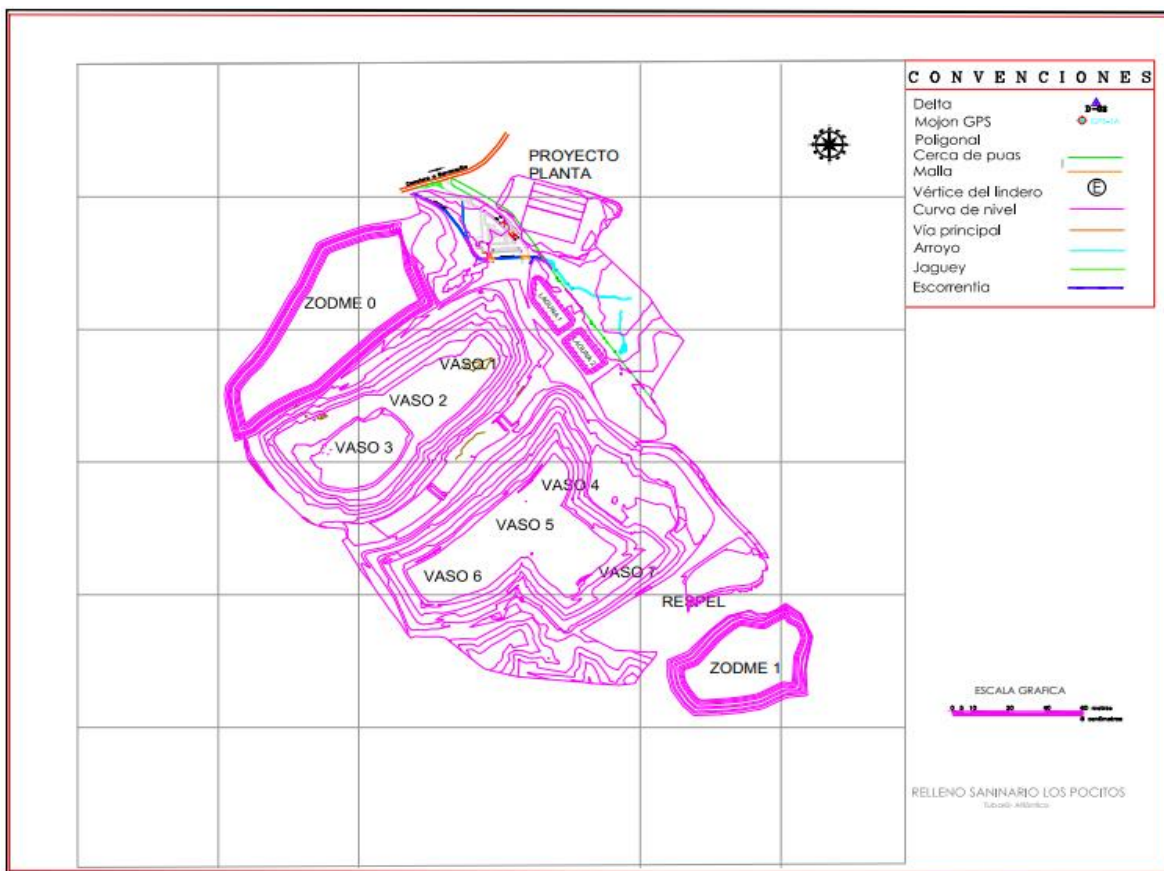
## 4.2. Localización Interna

El área total es de 135,5 hectáreas de las cuales se intervendrán 75,15 hectáreas para la construcción de las celdas de disposición para residuos ordinarios y peligrosos, 30,57 hectáreas para la construcción de obras (vías, adecuación de zonas de obtención, construcciones de lagunas de almacenamiento de lixiviados, básculas, oficinas y etc.) y 29,87 hectáreas como área de amortiguamiento de flora y fauna del proyecto.

En general las instalaciones del relleno cuentan con edificaciones estructuralmente construidas en ladrillos recubiertos por cemento, estructura en concreto rígido, vigas de concreto reforzadas, ventanas y puertas de vidrios, cielo raso en yeso cartón, paredes en bloques.

Figura 3

*Plano Interno Relleno Sanitario.*



Fuente: Triple A S.A. E.S.P. (2006)

### 4.3. Descripción de las Condiciones ambientales y climatológicas

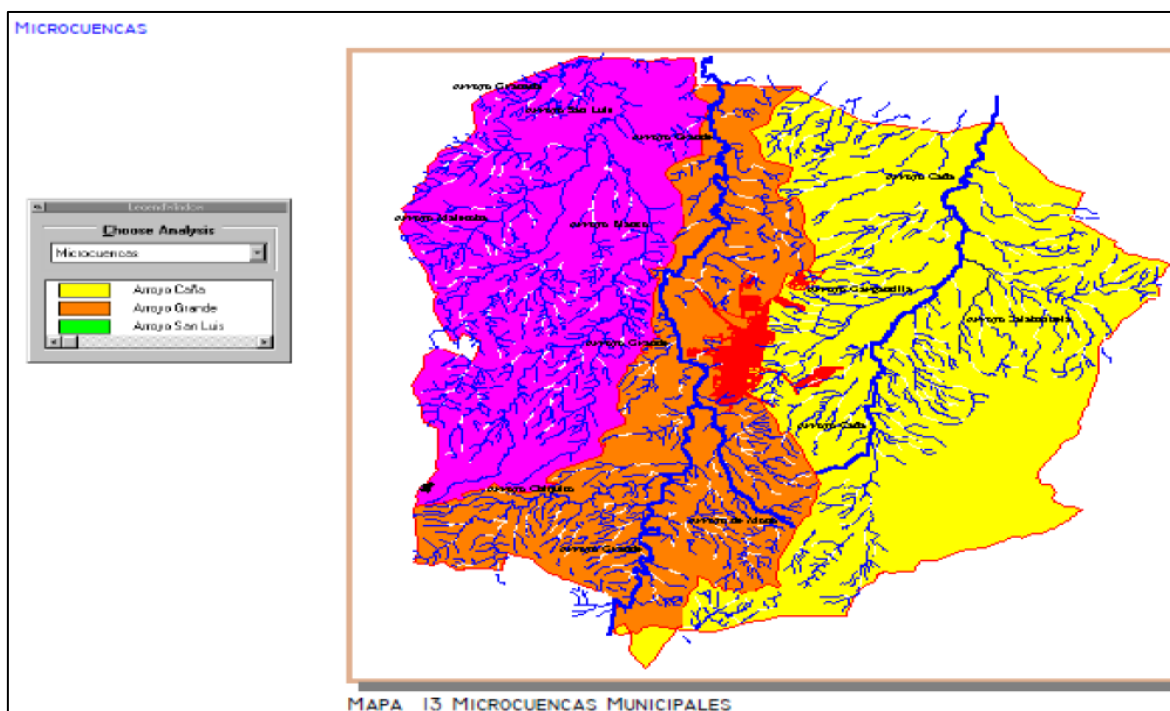
#### Red hidrológica

Se encuentra dentro de la Cuenca Hidrográfica de Mallorquín. La cuenca de Arroyo Grande comprende un área aproximada de 250 km<sup>2</sup>, entre las coordenadas 900.897 E y 1.688.897 N y 919.750 E y 1.716.536 N, y pertenece a los municipios de Barranquilla, Puerto Colombia, Tubará, Galapa y Baranoa.

El área de la Cuenca, queda definida a partir del nacimiento del arroyo Grande a la altura del corregimiento de Pital de Megua en el municipio de Baranoa, extendiéndose hacia el norte hasta desembocar en la margen suroccidental de la ciénaga de mallorquín.

Figura 4

*Red Hidrológica - Zona De Disposición Final.*



Fuente: Triple A S.A. E.S.P. (2006)

## **Geología**

La geología también suministra información relacionada con la ocurrencia de desastres naturales, bien sea por las características tectónicas o estructurales, por sismicidad, o por la naturaleza litológica (composición y estado de las rocas).

La geología del área del municipio presenta afloramientos del terciario constituyéndose en los más antiguos del municipio, también se presentan los depósitos del cuaternario asociados a los arroyos y caños que corren por el municipio.

## **Hidrogeología**

Para la caracterización hidrológica del municipio se tomó como base el Plan del Atlántico. El cual a su vez se realizó de acuerdo con el estudio adelantado por INGEOMINAS (1988) el área del Departamento del Atlántico fue dividida en once unidades hidrogeológicas, distinguidas con las siglas I1, I2, II1, III1, III2, III3, IV1, IV2, V1, V2 y VI1, correspondiendo cada una de ellas a unidades geológicas, las cuales, de acuerdo con su posición estructural, podrían estar conectadas hidráulicamente y pertenecer al mismo ambiente de deposición.

## **Geomorfología**

El potencial energético es función del grado de la pendiente, especialmente en aquellos procesos en los que interviene la gravedad terrestre. La tectónica es la responsable de las desnivelaciones y de la creación de las pendientes iniciales, las cuales son modificadas por los procesos morfo génicos desencadenados por el potencial energético. La gravedad, por sí sola, genera los movimientos de tipo puramente gravitacional; junto con el agua, es el motor que pone en funcionamiento las diferentes formas de escurrimientos: Sólido, plástico, líquido y los movimientos en masa hidrogravitacionales.

Las geoformas del municipio están asociadas a la dinámica del litoral caribe modelados por la influencia marina y eólica, también se encuentra la presencia de un modelado por los arroyos y un modelado denudativo erosional, en relieves de origen sedimentario.

En la génesis de las geoformas municipales tienen gran importancia las unidades morfo estructurales denominadas Llanuras cuaternarias, originadas por eventos fluviomarineros del Cuaternario que generaron espesas capas de sedimentos suprayacentes a las formaciones deposicionales del Terciario en las planicies de las costas Caribe y Pacífica.

### **Zona de vida y biodiversidad**

La Biodiversidad en el municipio de Galapa está representada más que todo por el Arroyo Grande, un ecosistema a tener en cuenta por sus características físicas y el papel que desempeña en el funcionamiento y dinámica de la región. Además como la corriente principal en el área rural; como el arroyo de Pital al norte del territorio municipal.

### **Flora**

En el área de estudio se observan vegetación natural que corresponde a bosque seco tropical, compuesta generalmente por matorrales espinosos, y de árboles con folíolos pequeños, gruesos y fuertes, generalmente se caen durante la época seca. Además aparecen los bosques riparios o de galerías. Las especies se encuentran diseminadas en los potreros o concentrada en pequeñas áreas boscosas.

Gran parte del territorio del municipio se enmarca dentro de las Sabanas de Gramíneas Arboladas. Son tipos de bosque de segundo crecimiento que aparecieron después de la tala y quema del bosque primario, establecimiento de cultivos y pastizales y posterior abandono de las áreas con la consiguiente aparición del rastrojo.

En el territorio municipal se encuentran pocos reductos de estos bosques con especies como el Roble Morado, Totumo, Guamacho, Roble Amarillo y Ceiba entre otros.

El matarratón (*Gliricidia sepium*) es el arbusto más común en este tipo de bosque y es utilizado para cercas y sombrío, como lindero de fincas y a lo largo de las carreteras. Al interior de las fincas se observan árboles grandes aislados, dejados como sombríos.

Entre éstos se destacan Roble Amarillo (*tabebuia chrisanthae*), Roble Morado (*Tabebuia Rosae*), la ceiba (*Ceiba pentandra*), el mango (*Mangúífera indica*) y el almendro (*Terminalia catapa*), Hobo, Naranjito, Uvito.

Los pastos son en su mayoría especies exóticas, utilizadas como forraje. Las especies más representativas son el guinea (*Panicum maximun*), grama (*Cynodon gayana*), zacate (*Chlotis gayana*).

## **Fauna**

Dentro de la fauna de invertebrados terrestres tenemos los siguientes: Scorpión, Arancae, Odonata, Orthoptera, Isoptera, Hemiptera, Homóptera, Coleóptero, Lepidoptera, Diptera e Hymenóptera. En la fauna de vertebrados terrestres se reportaron las clases: Mammalia, los órdenes: Mausupialia, Quiróptera, Carnívora, Rodentiz, Antiodáctilos, Lagomerpha y Sirenios.

El área del estudio está caracterizada por presentar condiciones climáticas altamente deficitarias en agua para el desarrollo vegetal. La evapotranspiración se sitúa por encima de los valores de precipitación en 7 de los 12 meses del año. La intervención antrópica y el uso inadecuado de los recursos naturales, se convierten en características que son limitantes para mantener el equilibrio de los factores bióticos de los ecosistemas de la región. Entre otras, esas limitantes se describen como "el déficit de agua, como factor determinante en la conservación de

bosques y preservación de las especies faunísticas”; la tala de árboles para la obtención de madera y carbón vegetal; adecuación de potreros para el fomento de ganadería extensiva; uso indiscriminado de agroquímicos y quemas. En razón de lo anterior, se ha generado un deterioro del ecosistema original local, con la intervención de los hábitats naturales, que se refleja en la pobre cobertura vegetal.

## Clima

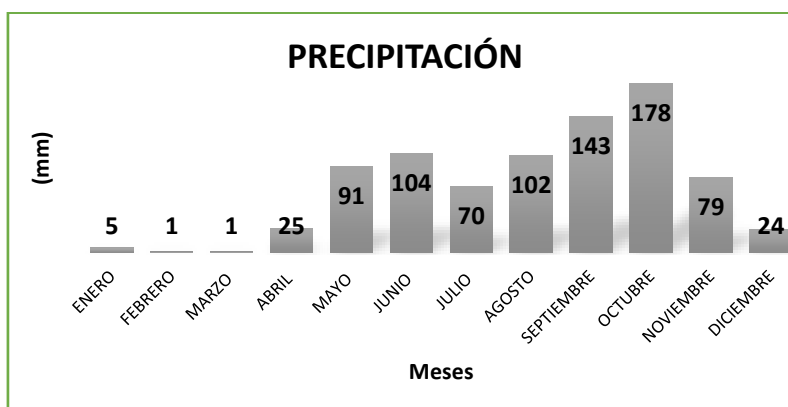
El clima de la zona de estudio Galapa es cálido, tropical, seco y semi seco.

## Precipitación

La precipitación durante el año es mono modal presentando un período muy bien definido entre Abril y Junio- Agosto hasta la primera quincena de Noviembre, durante el cual las lluvias oscilan entre 25 y 178 mm/mes; siendo el mes de octubre el más lluvioso. El período seco está conformado por los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y primera quincena de abril con los promedios entre 1.0 y 24.0 mm/mes.

Figura 5

*Precipitación Anual Ciudad Barranquilla.*



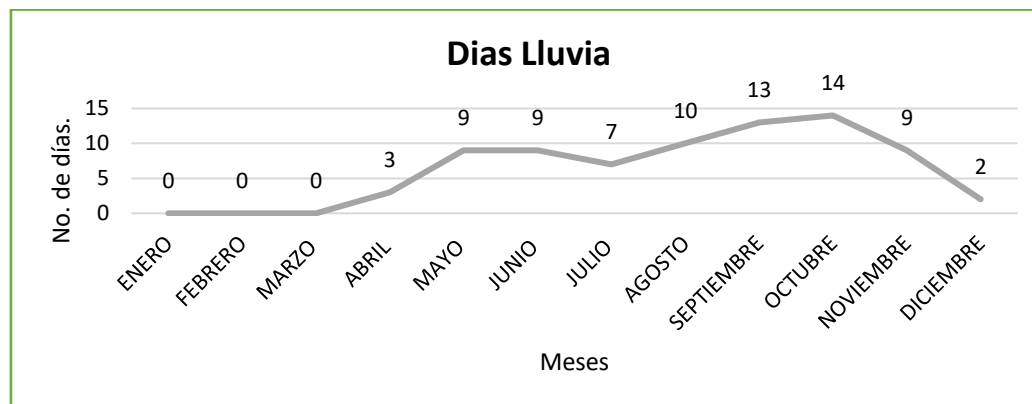
Fuente: CIOH. (2017).



Igualmente el número de días con precipitación oscila a lo largo del año entre 0.0 y 14 días.

**Figura 6**

*Días de lluvia presentados en la región durante el año.*



Fuente: CIOH. (2017)

## Temperatura

La variación de la temperatura media mensual es de 27.4 °C a lo largo del año. Así mismo, siete de los doce meses presentan temperaturas por encima de los 26.5°C. En cuanto a la temperatura máxima se aprecia una amplitud de 2.4 °C durante el año, superando siempre los 33.3 °C. Del mismo modo la temperatura mínima está por encima de los 21.4 °C hasta los 22.6 °C, ajustando una variación anual de 1.2 °C.

## Vientos

Durante la mayor parte del año se presentan flujos predominantes, con direcciones Noroeste y Norte de 42.7 y 25% respectivamente, con predominio de vientos moderados, Igualmente se registran frecuencias relativas, al Este, Sudeste y Sur con 5.8%, 6.1% y 6.1% respectivamente, destacando que en la región se presentan calmas del orden de 2.4%. La velocidad media del viento oscila entre 3.0 y 6.8 m/s a lo largo del año, presentándose las mayores

velocidades en los meses de enero, febrero, marzo y abril con valores entre 5.6 y 8.0 m/s. De lo cual se deduce que el área presenta variaciones significativas en la velocidad del viento.

### **Humedad relativa**

La humedad relativa de la región tiene características de tropical costera. Los valores promedios, varían entre 75% y 85%, con valores un poco más elevados hacia el interior del Departamento, que en la costa. El período de julio a noviembre es de un 5% a un 10% más húmedo que el resto del año.

Las fluctuaciones están entre 70 y 90% con extremos de 60 a 100%. Los máximos valores se presentan en la madrugada y los mínimos al medio día. Los períodos de máxima y mínima humedad coinciden, generalmente, con los de mayor y menor precipitación, respectivamente.

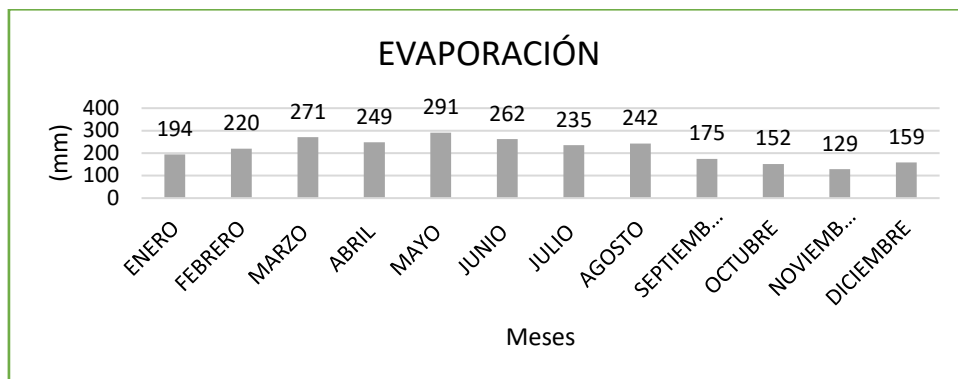
De abril a mayo y de agosto a noviembre se presenta la mayor inestabilidad atmosférica y hay producción de lluvias que se intensifican en el mes de octubre, así como los mayores niveles de agua en la atmósfera.

### **Evaporación**

La evaporación promedio mensual es baja, entre octubre y noviembre, con variaciones que van desde 129 mm a 175 mm. Por mes, y máxima entre marzo y agosto, con valores de 235 mm a 291 mm por mes.

Figura 7

*Evaporación durante el año.*



Fuente: CIOH. (2017)

### Brillo solar

La permanencia del brillo solar se reduce dependiendo de la altitud y la afecta de igual manera la topografía de la zona. El brillo solar es un indicador de la nubosidad y el estado del tiempo. Se destacan los meses de diciembre y enero con 255.5 y 280.0 horas/mes respectivamente, como los meses con mayor brillo y septiembre y octubre con 164.52 y 163.9 horas/mes, como los meses con menos brillo; meses pertenecientes a la época invernal del año. El resto de época del año oscilan entre 183.8 y 245.5 horas/mes, con picos de 302.3 y mínimos de 115.8 horas/mes.

### Nubosidad

La nubosidad influye sobre la radiación solar, de la cual depende la mayoría de elementos del clima. La nubosidad media mensual oscila entre 1 y 5 octas durante todo el año. Se presentan valores máximos y mínimos de 6 y 1 octas/mes.

### Balance hídrico

Para este caso se efectuó el balance hídrico con datos de evaporación, para la estación de la Base Naval. Presenta almacenamiento para los meses de septiembre, octubre y noviembre, registrándose para los dos primeros meses un exceso de 104.29 mm en total; en los demás meses

del año presenta un déficit significativo, siendo los meses de marzo y abril los de mayor déficit con 103.66 y 102.63 mm respectivamente.

## **5. MARCO LEGAL**

---

### **5.1. Constitución Nacional, La Constitución Política de Colombia de 1991**

Estableció el derecho a un medio ambiente sano como derecho colectivo, esta presenta 49 artículos concernientes al ambiente en los cuales, se cita el deber del estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente y de prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental. Entre los artículos podemos encontrar:

- **Artículo 80.** En el cual el Estado deberá planear el manejo y aprovechamiento adecuado de los recursos naturales, lo que permitirá garantizar la conservación, restauración o sustitución y además del desarrollo sostenible de los mismos recursos; a su vez el Estado deberá controlar y prevenir aquellos factores que impliquen un deterioro ambiental e imponer las sanciones legales pertinentes así como la reparación de los daños ambientales generados.

### **5.2. Ley 9 de Enero 24 de 1979.**

Por medio de esta ley se dictan medidas sanitarias entre las que se podrían mencionar:

- **Artículo 1.** Para proteger el medio ambiente se establecen normativas que serán la guía para las disposiciones y reglamentaciones necesarias con el fin de preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias en lo que se relaciona a la salud humana; Los procedimientos y las medidas que se deberán tomar la regulación, legalización y control

de los descargos de residuos y materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del Ambiente.

- **Artículo 25.** Únicamente se utilizarán para la disposición final de basuras aquellos terrenos que sean autorizados por el Ministerio de Salud o la entidad delegada.
- **Artículo 43.** Las normas de emisión de sustancias contaminantes de la atmósfera se refieren a la tasa de descarga permitida de los agentes contaminantes, teniendo en cuenta los factores topográficos, meteorológicos y demás características de la región.
- **Artículo 44.** Se prohíbe descargar en el aire contaminante en concentraciones y cantidades superiores a las establecidas en las normas que se establezcan al respecto.
- **Artículo 100.** El Ministerio de Salud establecerá métodos de muestreo, medición, análisis e interpretación para evaluar las condiciones ambientales en los lugares de trabajo.

### **5.3. Ley 99 de Diciembre 22 de 1993.**

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.

### **5.4. Ley 142 de 1994:**

Hace referencia al servicio público domiciliario de acueducto, alcantarillado y aseo; en donde la recolección municipal de residuos, principalmente líquidos, por medio de tuberías y conductos. También se aplicará esta Ley a las actividades complementarias de transporte, tratamiento y disposición final de tales residuos.

### **5.5. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000.**

Capítulo F. Regula las condiciones generales, los requisitos técnicos, el control y régimen sancionatorio y otros aspectos concernientes al sector de agua potable y saneamiento básico.

### **5.6. Decreto 2811 de Diciembre 18 de 1974**

Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

### **5.7. Decreto 1594 de Junio 26 de 1984**

Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - parte III - libro II y el título III de la parte III - libro I - del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y vertimientos de residuos líquidos.

### **5.8. Decreto 605 de 1996**

Reglamenta la Ley 142/1994 referida a servicio públicos domiciliarios, hace referencia a la prestación del servicio público domiciliario de aseo, en materias concernientes a sus componentes, niveles, clases, modalidades y calidad y al régimen de las entidades prestadoras del servicio y de los usuarios; señala el manejo que debe darse a los residuos sólidos en su componente de presentación, almacenamiento, recolección, transporte y disposición final, así mismo, determina las responsabilidades de algunos actores en la materia.

### **5.9. Decreto 1713 de 6 de agosto de 2002**

El Gobierno Nacional reglamento la Ley 142 de 1994, Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del Servicio Público de Aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1994 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.

**5.10. Decreto 838 de 2005 (marzo 23):**

Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.

**5.11. Decreto 3930 de 2010:**

Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la ley 9ª de 1979, así como el capítulo II del título VI parte III – Libro II del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

**5.12. Decreto 2981 de 2013**

Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de Aseo.

1. decreto 1077 de 2015
2. el Decreto 1784 del 2 de noviembre de 2017
3. *Resolución 1045 de 2003 (septiembre de 26)*: el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial adopto la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS, establece los plazos para iniciar la implementación de los PGIRS y para la clausura y restauración ambiental de los botaderos a cielo abierto y de los sitios de disposición final de Residuos Sólidos que no cumplan con la Normatividad Vigente a su adecuación a Rellenos Sanitarios.
4. *Resolución 672 de 2014*: Por la cual, se modifica parcialmente la Resolución 1541 de 2013.
5. *Resolución 2087 de 2014*: Por la cual se adopta a nivel nacional el protocolo para el monitoreo, control y vigilancia de olores ofensivos.

## 6. MARCO INSTITUCIONAL

---

### 6.1. Generalidades de la empresa

*Razón social.*

Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A E.S.P. “TRIPLE A”.

Sede Operativa: Km 13 vía Barranquilla - Tubará, Relleno Sanitario “Parque Ambiental Los Pocitos”

**Misión:**

Mejoramos la calidad de vida de la comunidad, operando con excelencia los servicios de acueducto, alcantarillado, aseo y complementarios, fundamentados en la responsabilidad social, innovación y compromiso de nuestros trabajadores, generando valor a nuestros grupos de interés.

**Visión:**

En el año 2020, seremos reconocidos en Colombia y la región como la empresa líder en cobertura, calidad, responsabilidad social y servicio a través de la prestación de servicios innovadores de acueducto, saneamiento básico y complementario.

**Valores corporativos**

- ✓ Servicio
- ✓ Transparencia
- ✓ Trabajo en equipo
- ✓ Innovación
- ✓ Compromiso
- ✓ Comunicación

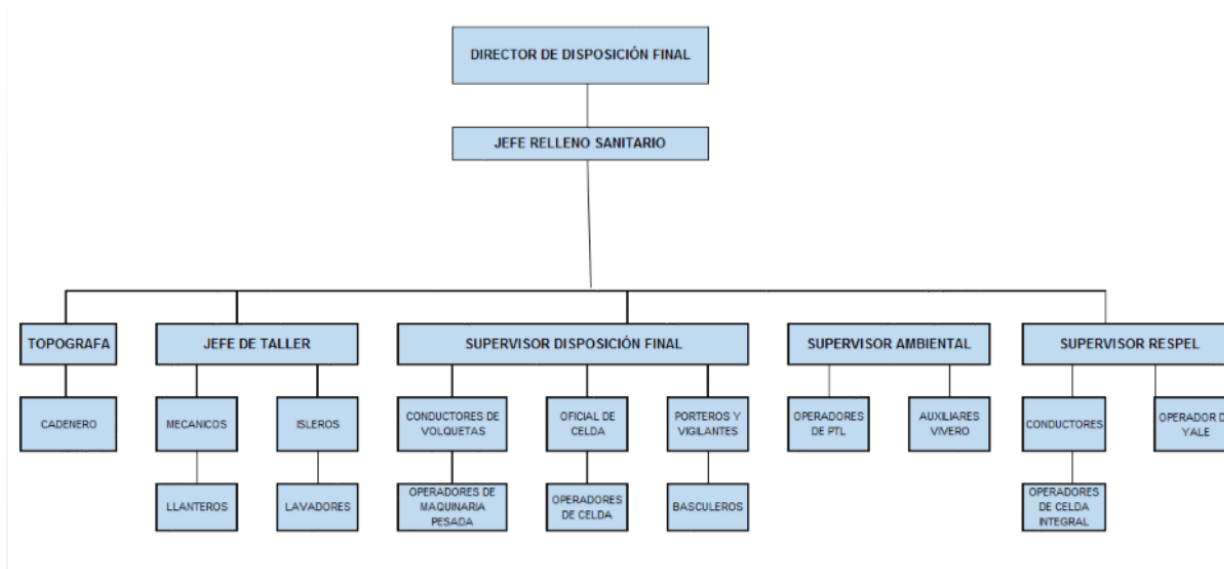


## 6.2. Estructura organizacional relleno sanitario

En la figura 13, se puede observar el organigrama general del relleno sanitario Parque Ambiental Los Pocitos.

Figura 8

*Organigrama del Relleno Sanitario Parque Ambiental Los Pocitos*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

## Sistemas de gestión

Triple A cuenta con los Sistemas de Gestión de Calidad y Seguridad y Salud certificados según los requisitos de la Norma ISO 9001:2008 y OHSAS 18001:2007 respectivamente. Actualmente se encuentra en proceso de implementación del Sistema de gestión Ambiental.

El objetivo del Sistema de Gestión de Calidad es satisfacer las necesidades y expectativas de los clientes y ha sido desarrollado de manera consistente con las necesidades de la organización, la estructura de la misma, los recursos, el tamaño, la cultura y el servicio que presta, teniendo en cuenta sus objetivos, así como los requisitos de la norma y los legales pertinentes. Así mismo, el

objetivo del Sistema de Seguridad y Salud Ocupacional es velar por la seguridad y salud de los trabajadores de la organización.

## 7. MARCO METODOLÓGICO

---

### 7.1. Tipo de Investigación

Esta investigación, se realiza bajo un enfoque cuantitativo, para la utilización de una información cuantificada y medible para la posterior interpretación del objeto de estudio; en este caso, la eficacia del sistema de riego por aspersión en el parque ambiental relleno sanitario “los pocitos” de la ciudad de Barranquilla. La recolección y análisis de datos, permite deducir una respuesta final de acuerdo a la variable estudiada.

En verbigracia al enfoque cuantitativo, existen varios tipos: Diseños experimentales, diseños cuasi - experimentales, investigaciones basadas en la encuesta social, entre otras. Este enfoque se vale de los números para examinar datos o información. Es uno de los métodos utilizados y la ciencia, matemática, informática y las estadísticas son las principales herramientas. Los datos se expresaran de manera matemática, es decir, se mostrara en números y gráficos lo que hemos observado en la recolección de la información.

En ese sentido, el tipo de investigación empleada es de tipo cuasi-experimental, la cual implica la aproximación a unos resultados sin el control absoluto de las distintas variables. Para Bono (s.f), *“los diseños cuasiexperimentales poseen un alto nivel de disponibilidad y flexibilidad, puesto que su aplicación es aconsejable cuando, debido a las limitaciones del contexto, no se puede utilizar un diseño experimental.”* Es decir, la aplicación no aleatoria surge como ventaja al momento de la aplicación de la metodología, debido al contexto, lo cual hace que sea necesaria su control.

En términos pragmáticos, las condiciones climáticas influirían significativamente en la eficiencia de evaporación, debido a la no manipulación rigurosa de las variables o factores experimentales y del control directo o por procedimientos estadísticos, de otros factores que pueden afectar el experimento. La recolección de datos tiene el propósito de determinar con la mayor confiabilidad posible la eficacia del sistema a diseñar.

### Diseño metodológico

En la metodología cuasi-experimental, existen dos diseños: el primero, Transversal; y el segundo Longitudinal.

Dentro de la perspectiva cuasi-experimental, los diseños pueden dividirse según dos estrategias de recogida de datos. La primera corresponde a la estrategia transversal o entre-sujetos, basada en la comparación de grupos no equivalentes. La segunda estrategia, la longitudinal, consiste en llevar a cabo comparaciones de tipo intra-sujeto, es decir, registrar la misma respuesta a lo largo de una serie de puntos en el tiempo. La diferencia entre ambas estrategias está en que la transversal se basa en el sentido estático de la comparación, y la longitudinal se caracteriza por su naturaleza dinámica o, en otros términos, enfatiza el carácter temporal de la comparación. (Bono, s.f)

Debido a lo anterior, es necesario señalar, los diseños transversales no poseen una rigurosidad frente al fenómeno estudiado, al no inferir en la causalidad de la variable. En cambio, los diseños longitudinales ofrecen más posibilidades de análisis en cuanto a la inferencia de relaciones causales. En ese sentido, se opta por la creación e implementación de un diseño cuasi-experimental de carácter longitudinal; al determinar, el análisis del objeto de estudio, en este caso el sistema de riego por aspersión y su eficacia en el proceso de evaporización del lixiviado tratado.

A la vez, el diseño longitudinal permite una medición secuencial en un periodo de tiempo determinado, que en el caso concreto de la prueba, se divide la aplicación de la prueba piloto en términos climáticos de tiempo seco y lluvioso.

Por medio de esta metodología, se efectúa la descripción, medición, registro, análisis e interpretación del problema; siendo de tipo cuantitativa por la relación y eficiencia de evaporación que generaría el proceso.

Técnica e instrumentos metodológicos.

Son las distintas modalidades de obtener la información del objeto de estudio analizado, para la implementación del diseño cuasi- experimental por longitud, la técnica es el análisis de series temporales. Antes, se define el Análisis de series temporales como el estudio estadístico de muestras de variables recogidas secuencialmente en un tiempo determinado. Para el análisis, del sistema de riego de aspersores, se opta también, por la observación y el análisis de contenido como técnicas directas. Los instrumentos a utilizar son: son el aspersor, el material sintético; y un tanque aforado.

#### **Procesos para la recolección de datos.**

- Montaje: Es la adecuación de zonas de trabajo para la aplicación de la prueba.
- Instalación: Se procede en instalar todo el material necesario para la prueba.
- Aplicación de la prueba: se estipula organiza un cronograma de implementación de la prueba de acuerdo a las condiciones climáticas del terreno.
- Recolección de la muestra: para determinar el valor exacto de retención de lixiviado remanente, para calcular la eficiencia del lixiviado evaporado

## 7.2. Población

Para empezar, el universo poblacional, es un conjunto de elementos de interés para la aplicación del método; a través, de técnicas e instrumentos, que dan como resultado, la medición del objeto de estudio. Es decir, la población específica sirve como delimitación del fenómeno. Según Arias (2000) la población es *"el conjunto finito o infinito de elementos con características comunes, para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda limitada por el problema y por los objetivos del estudio"*

En el caso concreto, de la presente investigación, el proyecto de mejora de la disposición final del lixiviado tratado con un sistema de aspersión, se hace con la finalidad de evaporar de forma eficiente producto no deseado y así lograr que el relleno sanitario de Barranquilla cuente con un proceso ecológico, natural, económico y recursivo sin que afecte las condiciones ambientales (Flora, fauna, cuencas hidrográficas, etc.) del entorno del relleno sanitario y a las personas que viven de forma aledaña.

Para el medio ambiente del relleno sanitario, le sería beneficioso porque este proceso no tendría contacto directo con este sistema, evitando que las partículas de lixiviado no llegue a ningún cuerpo de agua y adicional, que el relleno tiene prioridad la preservación del medio ambiente, porque en el proceso de clausura del mismo se convertirá en un parque ambiental.

Las personas que viven cerca del relleno sanitario y sus trabajadores no estarán en contacto con este sistema de aspersión, ya que las partículas de dispersión son mínimas y que el radio de dispersión del lixiviado tratado estará en un área exclusiva para el riego y evaporación del mismo.

### **7.3. Muestra**

Al momento de establecer una muestra representativa, se trabaja con un (1) aspersor, el cual su uso es la aplicación de la prueba piloto en busca de medir la efectividad de evaporación del lixiviado por sistema de riego de aspersión.

En el proceso de modelar el sistema de aspersión para evaporar el lixiviado tratado y aplicar las respectivas pruebas piloto en un entorno donde no afecte las condiciones operacionales y ambientales del relleno sanitario, implica que el método aplicada a las muestras son de forma estadística por la cantidad de lixiviado, por lo que es necesario evaporar en un área determinada del relleno sanitario para conocer la eficiencia del proceso.

### **7.4. . DISEÑO CUASI-EXPERIMENTAL**

#### **PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

***7.4.1. Etapa 1: Identificación de la cantidad promedio de lixiviado que está siendo tratado por la planta para posterior manejo y/o disposición.***

Para empezar, la elaboración de un diagnóstico técnico del sistema inicial del tratamiento de lixiviado, es necesario puntualizar, que el lixiviado corresponde a una acción físico-química de los residuos sólidos, pasando a un estado líquido de la materia, producto de variables como: humedad, temperatura, degradación de los residuos, etc.

Los desechos sólidos enterrados en el relleno sanitario están sometidos a un número de cambios biológicos, físicos y químicos simultáneos. La degradación biológica de los componentes orgánicos empieza en condiciones aeróbicas, consumiendo el aire atrapado dentro del relleno; al agotarse el oxígeno, la descomposición a largo plazo sigue bajo condiciones anaerobias. La degradación de los residuos está influida por el grado de compactación, la composición de los Residuos Sólidos Municipales, la humedad, y la temperatura; la tasa de producción de gases es el principal indicador de las reacciones biológicas en un relleno sanitario. (López y Santos, 2017)

Con respecto a lo anterior, desde los primeros años de funcionamiento, hasta el periodo actual, la planta de tratamiento del relleno sanitario de Barranquilla, no cuenta con sistema eficaz para la eliminación de los 49.365,51m<sup>3</sup> de lixiviado que son tratados en promedio al año; si bien, se hacían esfuerzos para solucionar el problema del lixiviado, los esfuerzos no eran lo suficiente. A pesar, que este consistía en una serie de acciones para dar solución; en primer lugar, se optó por la realización de un proceso de recirculación, bombeando el lixiviado tratado hacia la parte más alta de la masa de residuos en los vasos de disposición final semiclausurados permitiendo humectar los residuos para favorecer su degradación y mantener el nivel de la laguna tres.

Ahora bien, para hacer un diagnóstico ambiental del proceso de manejo y/o disposición final del lixiviado en el relleno sanitario de Barranquilla, el panorama no es muy alentador, ya que el relleno no cuenta con sistemas integrales de manejo de este tipo de producidos; el tratamiento físico-químico del lixiviado no es suficiente debido a la cantidad que se produce en promedio al año, como se mencionó en anteriores pasajes, cantidad que oscila en los 49.365,51m<sup>3</sup>. Igualmente, la implementación de métodos de recirculación por llenado de los vasos de disposición, no dan abasto; a todo la problemática anterior, se le suma, la capacidad de las

lagunas de tratamiento del lixiviado, que en determinadas épocas del año, exactamente en los periodos de invierno, sobrepasa su capacidad de retención.

En ese sentido, siempre se buscara proveer cualquier tipo de anomalías ambientales, y más, en una problemática manifiesta como lo genera el manejo y disposición final del lixiviado. Sin embargo, existen planes de contingencia ante cualquier emergencia en el relleno sanitario. Pero, en lo que se ha diagnosticado previamente de acuerdo a la experiencia, en temporada invernal, existe el riesgo latente de desborde de las lagunas de lixiviado al mantenerse al límite de su capacidad por el incremento del volumen de la laguna, y la posible generación de la saturación de lixiviados de la masa de residuo en los 7 vasos de disposición actualmente usados. También, cabe resaltar, de acuerdo a estudios científicos, se ha demostrado el impacto negativo del lixiviado, al albergar una serie de contaminantes presentes que pueden llegar a producir cáncer, enfermedades genéticas, esterilidad, abortos, enfermedades coronarias y otros efectos de tipo crónico, etc.

Para lo mencionado anteriormente, el riego por aspersión, para la evaporización del lixiviado, es la solución, para la disminución del lixiviado tratado en las lagunas. Sin embargo, se hace necesario, hacer un recuento de como se ha venido dando la disminución del lixiviado a partir de la adopción de métodos para su remoción, y con la implementación del sistema por aspersión, los resultados serán mayores en eficacia frente a otros sistemas de riegos convencionales.

En este apartado, busca mostrar el comportamiento del lixiviado tratado en el relleno entre el año 2014 a 2017, a través de tablas que cuantifican el caudal producido de lixiviado durante este periodos de tiempo. En ese sentido, la cantidad de lixiviado producido o manejado en un



relleno sanitario de una serie de factores como; la precipitación dada sobre el área, la técnica utilizada, cantidad de residuos recibidos y puntualidad en la cobertura de los mismos. Es menester recordar, que los volúmenes totales requeridos para la disposición de los residuos sólidos provenientes del área metropolitana de Barranquilla están establecidos en un lapso de 30 años, es de 20.173.483. m<sup>3</sup>. Determinados tal como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 3.

*Programación de vida útil del relleno sanitario.*

SECUENCIA DE DESARROLLO			TOPOGRAFIA DE CALCULO	VOLUMEN DE RELLENO (m3)		VIDA ÚTIL			VIDA ÚTIL POR SECTOR		
ZONA	SECTOR	NIVEL		Por sector	Acum.	Horizonte	Años	Acum.	Años	Meses	Días
ZONA A1	SECTOR 1	NIVEL 10m	SECTOR 1 +10m	736,956	736,956	2,008.4	1.4	1.4	1	5	4
	SECTOR 1	NIVEL 20m	SECTOR 1 +20m	548,347	1,285,303	2,009.5	1.0	2.5	1	5	17
	SECTOR 2	NIVEL 10m	SECTOR 2 +10m	1,091,113	2,376,416	2,011.5	2.0	4.5	1	5	15
	SECTOR 2	NIVEL 20m	SECTOR 2 +20m	910,298	3,286,714	2,013.1	1.6	6.1	1	0	24
	SECTORES 1 y 2	NIVEL 35m	Domo Clausura 1	1,064,411	4,351,125	2,014.9	1.8	7.9	1	10	17
	SECTOR 3	NIVEL 10m	SECTOR 3 +10m	1,369,145	5,720,269	2,017.1	2.2	10.1	2	1	15
	SECTOR 3	NIVEL 20m	SECTOR 3 +20m	1,142,421	6,862,690	2,018.9	1.8	11.9	1	11	6
	SECTOR 3	NIVEL 35m	Domo Clausura 2	639,409	7,502,099	2,019.9	1.0	12.9	0	11	2
ZONA A2	SECTOR 4	NIVEL 10m	SECTOR 4 +10m	887,251	8,389,350	2,021.3	1.3	14.3	1	3	6
	SECTOR 5	NIVEL 10m	SECTOR 5 +10m	1,225,070	9,614,420	2,023.1	1.8	16.1	1	0	29
	SECTOR 5	NIVEL 20m	SECTOR 5 +20m	1,231,313	10,845,733	2,024.9	1.8	17.9	1	10	8
	SECTOR 5	NIVEL 30m	SECTOR 5 +30m	1,052,689	11,898,422	2,026.3	1.5	19.3	1	4	1
	SECTOR 4	NIVEL 20m	SECTOR 4 +20m	1,245,303	13,143,725	2,028.1	1.7	21.1	1	0	20
	SECTOR 4	NIVEL 30m	SECTOR 4 +30m	1,113,524	14,257,249	2,029.6	1.5	22.6	1	6	22
ZONA A3	SECTOR 6	NIVEL 10m	SECTOR 6 +10m	1,111,477	15,368,726	2,031.0	1.5	24.0	1	0	15
	SECTOR 6	NIVEL 20m	SECTOR 6 +20m	1,386,320	16,755,046	2,032.9	1.8	25.9	1	10	7
	SECTOR 6	NIVEL 30m	SECTOR 6 +30m	1,092,788	17,847,834	2,034.3	1.4	27.3	1	3	3
ZONAS A1, A2 y A3	SECTORES 3 y 5	NIVEL 37m	Domo Clausura 2	1,323,036	19,170,870	2,035.9	1.7	28.9	1	11	7
	SECTORES 4 y 6	NIVEL 37m	Domo de Clausura 3	1,002,613	20,173,483	2,037.2	1.3	30.2	1	2	10

Triple A S.A. E.S.P. (2017)

Adicional, con los datos suministrados por funcionarios de la entidad, se obtiene información histórica para analizar el comportamiento de caudal mensual en m3 tanto del lixiviado generado por la operación o vasos de disposición, como el caudal de lixiviado tratado por la planta de tratamiento.

Tabla 4

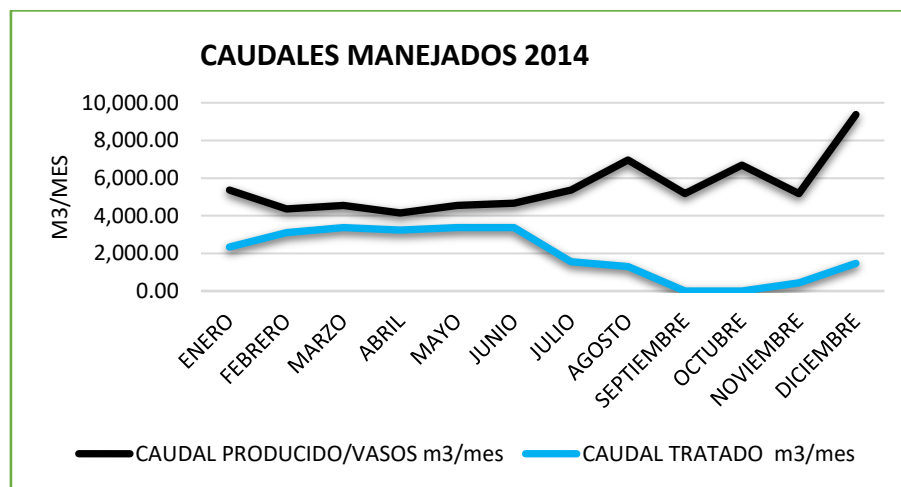
*Caudal Manejado De Lixiviado Año (2014).*

CAUDAL DE LIXIVIADOS										
MES	TIEMPO		CAUDAL	CAUDAL		TIEMPO		CAUDAL	CAUDAL TRATADO	
	Horas	Días	L/S	m3/día	m3/mes	Horas	Días	L/S	m3/día	m3/mes
ENERO	24	31	2,00	172,80	5.356,80	24	27	1,00	86,40	2.332,80
FEBRERO	24	28	1,80	155,52	4.354,56	24	24	1,50	129,60	3.110,40
MARZO	24	31	1,70	146,88	4.553,28	24	26	1,50	129,60	3.369,60
ABRIL	24	30	1,60	138,24	4.147,20	24	25	1,50	129,60	3.240,00
MAYO	24	31	1,70	146,88	4.553,28	24	26	1,50	129,60	3.369,60
JUNIO	24	30	1,80	155,52	4.665,60	24	26	1,50	129,60	3.369,60
JULIO	24	31	2,00	172,80	5.356,80	24	18	1,00	86,40	1.555,20
AGOSTO	24	31	2,60	224,64	6.963,84	24	10	1,50	129,60	1.296,00
SEPTIEMBRE	24	30	2,00	172,80	5.184,00	24	0	0,00	0,00	0,00
OCTUBRE	24	31	2,50	216,00	6.696,00	24	0	0,00	0,00	0,00
NOVIEMBRE	24	30	2,00	172,80	5.184,00	24	5	1,00	86,40	432,00
DICIEMBRE	24	31	3,50	302,40	9.374,40	24	17	1,00	86,40	1.468,80
TOTAL AÑO					66.389,76					23.544,00

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Figura 9

*Caudales Lixiviados Manejados Año 2014.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

	CAUDAL PRODUCIDO	CAUDAL TRATADO
TOTAL AÑO M <sup>3</sup>	66.389,76	23.544,00

Durante el año 2014, quinto año de inaugurado el relleno sanitario se observa una producción de lixiviado de 66.389,76 m<sup>3</sup> proveniente de los vasos de disposición. Igualmente observamos un caudal tratado de 23.544,00 m<sup>3</sup>. Es decir, durante este año se trató el 35.4% del total de los lixiviados.

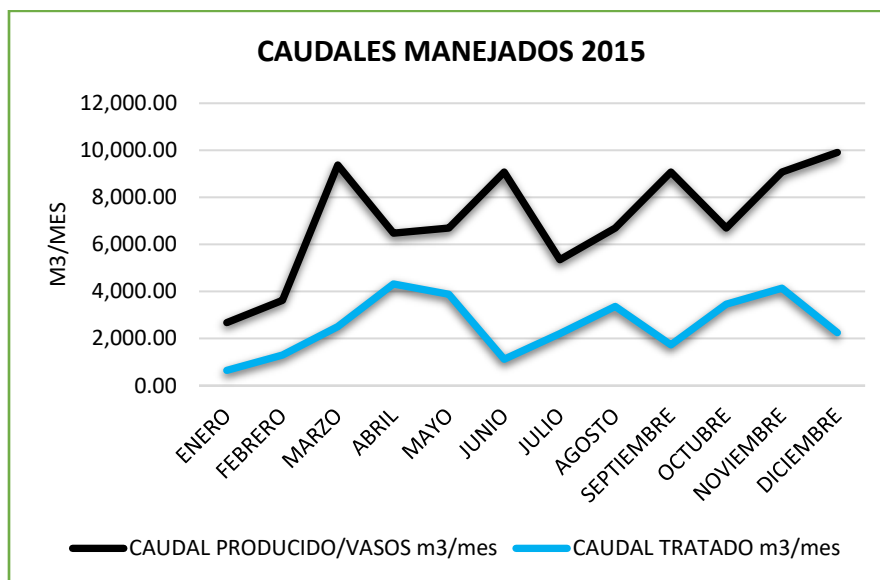
Tabla 5

*Caudal Manejado De Lixiviado Año (2015).*

CAUDAL DE LIXIVIADOS										
MES	TIEMPO		CAUDAL	CAUDAL		TIEMPO		CAUDAL	CAUDAL TRATADO	
	Horas	Días	L/S	m3/día	m3/mes	Horas	Días	L/S	m3/día	m3/mes
ENERO	24	31	1,00	86,40	2.678,40	24	5	1,50	129,60	648,00
FEBRERO	24	28	1,50	129,60	3.628,80	24	10	1,50	129,60	1.296,00
MARZO	24	31	3,50	302,40	9.374,40	24	29	1,00	86,40	2.505,60
ABRIL	24	30	2,50	216,00	6.480,00	24	20	2,50	216,00	4.320,00
MAYO	24	31	2,50	216,00	6.696,00	24	15	3,00	259,20	3.888,00
JUNIO	24	30	3,50	302,40	9.072,00	24	13	1,00	86,40	1.123,20
JULIO	24	31	2,00	172,80	5.356,80	24	17	1,50	129,60	2.203,20
AGOSTO	24	31	2,50	216,00	6.696,00	24	26	1,50	129,60	3.369,60
SEPTIEMBRE	24	30	3,50	302,40	9.072,00	24	20	1,00	86,40	1.728,00
OCTUBRE	24	31	2,50	216,00	6.696,00	24	20	2,00	172,80	3.456,00
NOVIEMBRE	24	30	3,50	302,40	9.072,00	24	24	2,00	172,80	4.147,20
DICIEMBRE	24	31	3,70	319,68	9.910,08	24	26	1,00	86,40	2.246,40
TOTAL AÑO					151.122,24					54.475,20

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Figura 10

*Caudales Lixiviados Manejados Año 2015*

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

	CAUDAL PRODUCIDO	CUADAL TRATADO
TOTAL AÑO M/3	151.122,24	54.475,20

Durante el año 2015, se observa una producción de lixiviado de 151.122.24 m<sup>3</sup> proveniente de los vasos de disposición. Igualmente observamos un caudal tratado de 54.475.20 m<sup>3</sup>. Es decir, durante este año se trató el 36.0% del total de los lixiviados.

Tabla 6

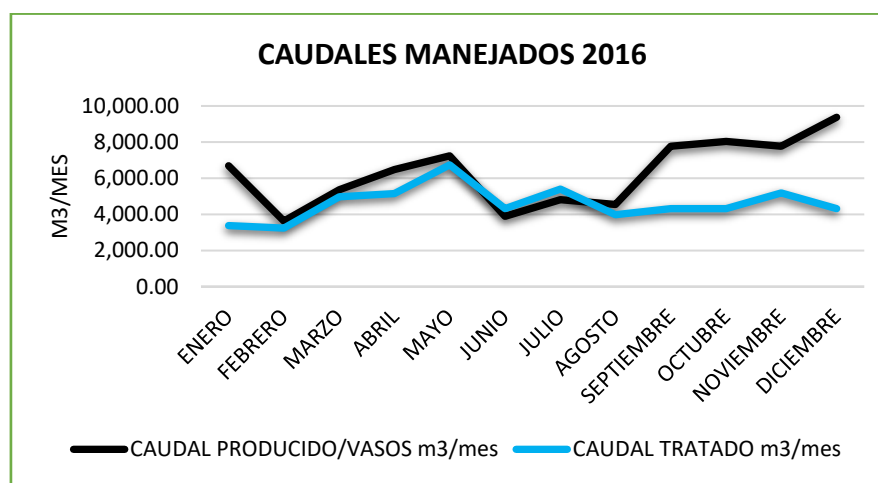
*Caudal Manejado De Lixiviado Año (2016).*

CAUDAL DE LIXIVIADOS										
MES	TIEMPO		CAUDAL	CAUDAL		TIEMPO		CAUDAL	CAUDAL TRATADO	
	Horas	Días	L/S	m3/día	m3/mes	Horas	Días	L/S	m3/día	m3/mes
ENERO	24	31	2,50	216,00	6.696,00	24	26	1,50	129,60	3.369,60
FEBRERO	24	28	1,50	129,60	3.628,80	24	25	1,50	129,60	3.240,00
MARZO	24	31	2,00	172,80	5.356,80	24	23	2,50	216,00	4.968,00
ABRIL	24	30	2,50	216,00	6.480,00	24	17	3,50	302,40	5.140,80
MAYO	24	31	2,70	233,28	7.231,68	24	26	3,00	259,20	6.739,20
JUNIO	24	30	1,50	129,60	3.888,00	24	25	2,00	172,80	4.320,00
JULIO	24	31	1,80	155,52	4.821,12	24	25	2,50	216,00	5.400,00
AGOSTO	24	31	1,70	146,88	4.553,28	24	23	2,00	172,80	3.974,40
SEPTIEMBRE	24	30	3,00	259,20	7.776,00	24	25	2,00	172,80	4.320,00
OCTUBRE	24	31	3,00	259,20	8.035,20	24	25	2,00	172,80	4.320,00
NOVIEMBRE	24	30	3,00	259,20	7.776,00	24	24	2,50	216,00	5.184,00
DICIEMBRE	24	31	3,50	302,40	9.374,40	24	25	2,00	172,80	4.320,00
TOTAL AÑO					75.617,28					55.296,00

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Figura 11

*Caudales Lixiviados Manejados Año 2016.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

	CUADAL PRODUCIDO	CAUDAL TRATADO
TOTAL AÑO M/3	75.617,28	55.296,00

Durante el año 2016, se observa una producción de lixiviado de 75.617.28 m<sup>3</sup> proveniente de los vasos de disposición. Igualmente observamos un caudal tratado de 55.296.00 m<sup>3</sup>. Es decir, durante este año se trató el 73.1 % del total de los lixiviados.

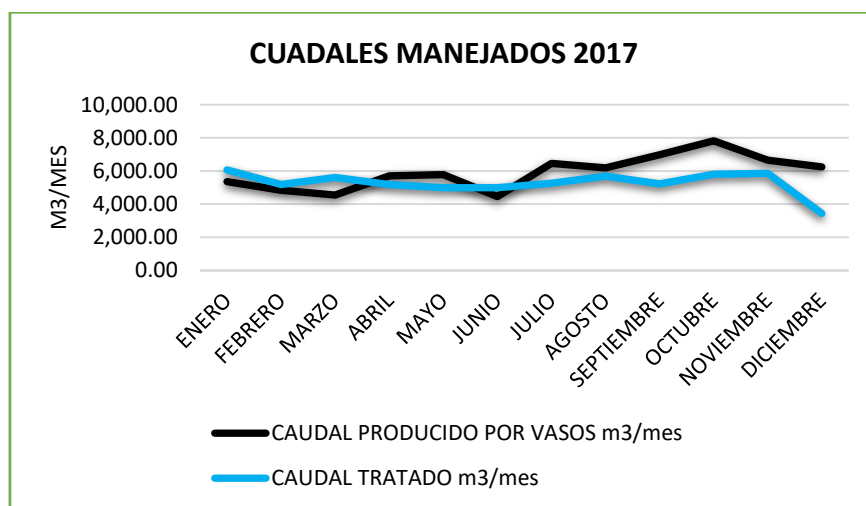
Tabla 7

*Caudal Manejado De Lixiviado Año (2017).*

CAUDAL DE LIXIVIADOS										
MES	TIEMPO		CAUDAL	CAUDAL		TIEMPO		CAUDAL	CAUDAL TRATADO	
	Horas	Días	L/S	m3/día	m3/mes	Horas	Días	L/S	m3/día	m3/mes
ENERO	24	31	2,00	172,80	5.356,80	24	26	2,70	233,28	6.065,28
FEBRERO	24	28	2,00	172,80	4.838,40	24	24	2,50	216,00	5.184,00
MARZO	24	31	1,70	146,88	4.553,28	24	26	2,50	216,00	5.616,00
ABRIL	24	30	2,20	190,08	5.702,40	24	25	2,40	207,36	5.184,00
MAYO	24	31	2,16	186,62	5.785,34	24	21	2,75	237,60	4.989,60
JUNIO	24	30	1,72	148,61	4.458,24	24	27	2,14	184,90	4.992,19
JULIO	24	31	2,41	208,22	6.454,94	24	27	2,26	195,26	5.272,13
AGOSTO	24	31	2,31	199,58	6.187,10	24	28	2,35	203,04	5.685,12
SEPTIEMBRE	24	30	2,69	232,42	6.972,48	24	28	2,16	186,62	5.225,47
OCTUBRE	24	31	2,92	252,29	7.820,93	24	27	2,49	215,14	5.808,67
NOVIEMBRE	24	30	2,57	221,96	6.658,85	24	29	2,34	202,18	5.863,10
DICIEMBRE	24	31	2,33	201,31	6.240,67	24	22	1,81	156,38	3.440,45
TOTAL AÑO					71.029,44					63.326,02

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Figura 13

*Caudales Lixiviados Manejados Año 2017*

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

	CAUDAL PRODUCIDO	CAUDAL TRATADO
TOTAL AÑO M/3	71.029,44	63.326,02

Durante el año 2017, se observa una producción de lixiviado de 71.029.44 m<sup>3</sup> proveniente de los vasos de disposición. Igualmente observamos un caudal tratado de 63.326.02 m<sup>3</sup>. Es decir, durante este año se trató el 89.1 % del total de los lixiviados.

El promedio de los lixiviados manejados durante los últimos 4 años de operación del relleno sanitario se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 8

*Caudal Producido y Tratado de Lixiviado.*

AÑOS	CAUDAL	
	PRODUCIDO (m3)	TRATADO (m3)
2014	66.389,76	23.544,00
2015	151.122,24	54.475,20
2016	75.617,28	55.296,00
2017	71.029,44	63.326,02
<b>TOTAL</b>	<b>364.158,72</b>	<b>196.641,22</b>

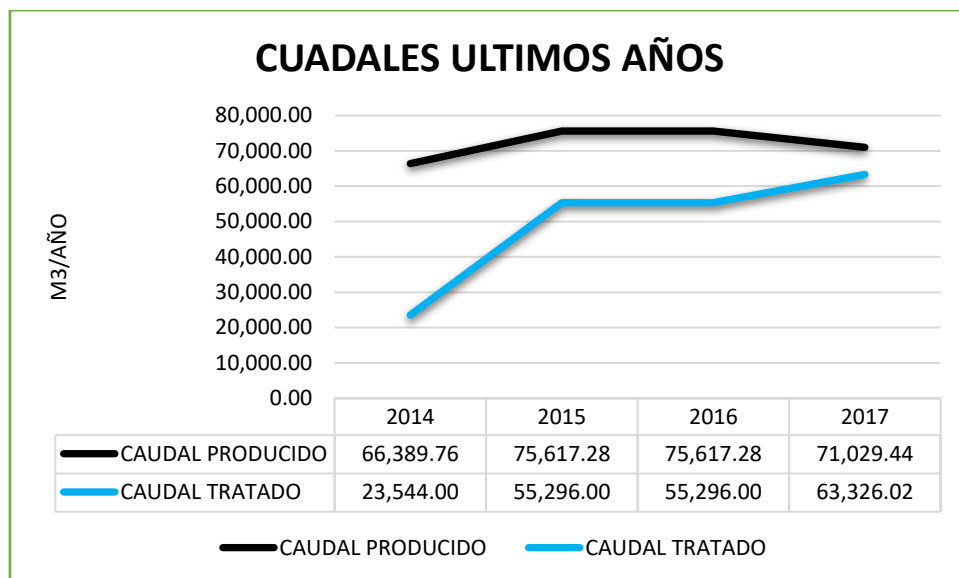
Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Estos valores se deben al proceso productivo de la planta de tratamiento de lixiviado, ya que hubo momentos donde se realizaba el mantenimiento preventivo y correctivo; adicional que hubo parada de la planta, provocando que el caudal tratado sea menor al producido por los vasos. Con respecto al lixiviado producido, la tendencia de ser mayor a 70.000 m<sup>3</sup> se debe a la temporada de lluvia que hubo durante esos años, provocando que la infiltración de agua fuera mayor en los vasos y terminara mezclada con el lixiviado generado por los vasos.



Figura 12

*Caudales Lixiviados Manejados Últimos Años.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Observamos que en promedio durante los últimos 4 años se han tratado solamente el 54% de los lixiviados generados durante la operación del relleno sanitario, presentándose un remanente de 46% en el total de lixiviado a tratar.

En el sitio actualmente la planta de tratamiento no cuenta con sistema para la eliminación de los 49.365,51m<sup>3</sup> de lixiviado que son tratados en promedio al año, para el manejo del lixiviado se realiza un proceso de recirculación, bombeando el lixiviado tratado hacia la parte más alta de la masa de residuos en los vasos de disposición final semiclausurados permitiendo humectar los residuos para favorecer su degradación y mantener el nivel de la laguna 3, además el proceso se complementa con un sistema de reguio de áreas clausuradas con un vehículo tipo carro tanque, lo anterior representa un incremento en costos de operación de la planta teniendo en cuenta que hay una permanente recirculación del lixiviado que a futuro rebasaría la capacidad de las lagunas

obligando a la empresa a invertir en la construcción de lagunas con mayor capacidad además del sobrecosto por consumo de químicos en el tratamiento de clarificación.

A pesar de contar con los debidos planes de contingencia, ambientalmente existe riesgo de desborde principalmente en temporada invernal cuando las lagunas se mantienen al límite de su capacidad por el incremento de la generación de lixiviados de la masa de residuo de los 7 vasos de disposición actualmente usados.

**7.4.2. Etapa 2: Cuantificación de la capacidad de evaporación por aspersión teniendo en cuenta tasas de evaporación a partir de datos meteorológicos.** En esta prueba se determinará la eficiencia del sistema de aspersión aplicado en el relleno, teniendo en cuenta el objetivo principal del proyecto y verificando la precipitación máxima del aspersor; sin afectar la capacidad de infiltración del terreno, con la finalidad de evitar la producción de estancamiento del lixiviado sobre el suelo o generación de escorrentías indeseables, que puede ser un problema al momento de recircular el lixiviado.

La prueba de aspersión se realiza para conocer la cantidad de lixiviado que llega a ser evaporado de acuerdo a las siguientes condiciones climáticas:

- ✓ Tiempo Seco o soleado
- ✓ Tiempo Nublado

En particular ciudades como Barranquilla, cuentan con una intensidad de radiación solar en promedio de 1944 horas de sol al año o 4,5 horas de sol por día, lo cual refleja un gran porcentaje de horas sol comparado con otras ciudades. *Viva Solar Colombia* (2017).

El mes de mayor evaporación durante todo el año es el mes de Junio, con un promedio de unos 304.1 mm y los meses con más baja evaporación son septiembre, octubre y noviembre, siendo entre estos octubre el de menor evaporación con 122,7 mm. *Arroyos de Barranquilla* (2017).

7.4.2.1. *Montaje.* Durante el montaje se adecua una zona de trabajo para la prueba, con el área suficiente para cubrir el radio de trabajo del aspersor teniendo en cuenta características tales como el diámetro de alcance y el caudal promedio de trabajo en condiciones ideales, en este caso a 2 Bares de presión, 9.5 m de radio y 0.06 l/seg; se construye un jarillón o barrera de contención con arcilla de forma perimetral con un diámetro de 20 m en la zona para contener las posibles escorrentías y mantener un control de humedad generada por el aspersor durante la prueba. (Figura 18).

*Figura 13*

*Jarillón en arcilla*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Posteriormente a la adecuación del terreno se instala un revestimiento con material o tela sintética impermeable sobre el área de trabajo con el fin de determinar la cantidad de lixiviado remanente que se obtiene después de la prueba piloto de aspersión. (Figura 19).

*Figura 14*

*Material sintético.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Ya con el montaje del material sintético, se instala en el centro del área de aspersión, un aspersor tipo de impacto (Figura 20) con una sección de 12 m de tubería de polietileno de ½” de diámetro estándar con una bomba de baja capacidad para bombear el lixiviado tratado en el aspersor y durante un periodo de 6 horas continuos de aplicada la aspersión se obtiene que un total de 1.296 l/h de lixiviado fue aplicada sobre el área de trabajo.

Figura 15

*Aspersor tipo de impacto*



Fuente: Leroy Merlin (2017).

Ya montado el sistema de aspersión de la prueba piloto, se realiza pruebas durante el tiempo seco y nublado.

7.4.2.2. *Prueba con tiempo seco o soleado.* En esta condición climática, se realizaron 3 pruebas en días distintos del mes de junio desde las 9:00 hasta las 15:00, que son las horas de mayor radiación solar con cielo despejado, aplicando un bombeo controlado del lixiviado a través del aspersor cuyo caudal es recibido inicialmente sobre el suelo seco y compactado para ver el comportamiento del lixiviado sobre el material arcilloso y encontramos que se absorbe el lixiviado con una pequeña película sin generar algún estancamiento del mismo. Acto seguido se procede a la aspersión de 6 horas de tiempo soleado en los días 07, 12 y 22 de Junio del 2017 que fueron días con alta radiación solar.

Tabla 9

*Condiciones climáticas durante el mes de Junio 2017.*

<b>CONDICIONES CLIMÁTICAS – JUNIO 2017</b>				
<b>FECHA</b>	<b>PRESIÓN (in Hg)</b>	<b>TEMPERATURA (°F)</b>	<b>HUMEDAD RELATIVA (%)</b>	<b>VELOCIDAD DEL VIENTO (mph)</b>
<b>07/06/2017</b>	29,90	84	63	14
<b>12/06/2017</b>	29,79	81	65	12
<b>22/06/2017</b>	29,87	84	60	12

*Fuente:* Estación meteorológica del Relleno Sanitario Parque Ambiental Los Pocitos (2017)

Durante los tres días de la prueba se procedió a bombear el lixiviado a través del aspersor en las 6 horas relacionadas, cuyo caudal remanente es recogido por la tela sintética para determinar la cantidad evaporada.

*Figura 16*

*Prueba Tiempo soleado.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Al finalizar la prueba en tiempo soleado durante los tres días, el lixiviado remanente sobre el material sintético fue envasado en un tanque aforado, para determinar el valor exacto que se retuvo en la tela sintética. Esta cantidad se relaciona en la tabla 10.

Figura 17

*Recolección del lixiviado en la prueba de aspersión.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

La cantidad de lixiviado remanente que estuvo presente en el material sintético durante los tres días de las pruebas, se relaciona en la tabla 10 y conociendo estas cantidades, se determina la eficiencia de evaporación del lixiviado con la siguiente formulación:

*Eficiencia de Evaporación*

$$= \frac{\text{Cantidad de lixiviado asperjado} - \text{Cantidad de lixiviado remanente}}{\text{Cantidad de lixiviado asperjado}} \times 100$$

La cantidad de lixiviado asperjado durante la prueba se determina teniendo en cuenta el caudal promedio del aspersor en condiciones de presión controlada (0.06 l/s) y el tiempo de bombeo el cual fue de 6 horas.

$$Q = \frac{V}{T} \gg V = Q \times T$$

Dónde:

$V$ : Cantidad del Lixiviado Asperjado (l)

$Q$ : Caudal de salida en el aspersor = 0,06 l/s

$T$ : Tiempo de aspersión = 6 horas = 21.600 s

$$V = 0,06 \frac{l}{seg} \times 21.600 seg = \mathbf{1.296 l}$$

Tabla 10

*Eficiencia de la prueba piloto – Tiempo Seco.*

PRUEBA PILOTO DE ASPERSIÓN – TIEMPO SECO			
FECHA	LIXIVIADO ASPERJADO (l)	LIXIVIADO REMANENTE (l)	EFICIENCIA DE EVAPORACIÓN (%)
07/06/2017	1.296	150	88,43
12/06/2017	1.296	175	86,50
22/06/2017	1.296	165	87,27

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Verificando la eficiencia de evaporación en la tabla 10, vemos que el proceso de evaporación del lixiviado tratado durante las 6 horas de aspersión en la prueba piloto tiene eficiencia promedio de 87,40%, demostrando que es muy rentable para un solo aspersor. Durante la prueba no se evidencia estancamiento, ni escorrentía de lixiviado.

Figura 18

*Aspersión directamente sobre el terreno*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Figura 19

*Cantidad de lixiviado recolectado en la prueba*





Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

7.4.2.3. *Tiempo Nublado.* Para el tiempo nublado, se realizaron 3 pruebas en días distintos del mes de octubre desde las 9:00 hasta las 15:00, que son las horas de mayor radiación solar, pero con alta nubosidad. Se efectúa el mismo procedimiento del tiempo soleado para la prueba de aspersión. Esta prueba piloto se realizó en los días 16, 19 y 25 de Octubre del 2017 que fueron los días donde no hubo presencia de lluvia y estuvo completamente nublado.

Figura 20

*Tiempo nublado.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Figura 21

*Retención de la prueba sobre el material sintético.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Tabla 11

*Condiciones climáticas durante el mes de Octubre 2017.*

CONDICIONES CLIMÁTICAS – OCTUBRE 2017				
FECHA	PRESIÓN (in Hg)	TEMPERATURA (°F)	HUMEDAD RELATIVA (%)	VELOCIDAD DEL VIENTO (mph)
16/10/2017	29,82	86	55	12
19/10/2017	29,86	82	60	15
25/10/2017	29,91	81	59	9

Fuente: Estación meteorológica del Relleno Sanitario Parque Ambiental Los Pocitos (2017)

Se repite el procedimiento de recolección del lixiviado remanente y los cálculos para la determinación de la eficiencia de evaporación como la prueba de tiempo seco. Los resultados obtenidos de la eficiencia se relacionan en la tabla 12.

Tabla 12

*Eficiencia de la prueba piloto – Tiempo Nublado.*

<b>PRUEBA PILOTO DE ASPERSIÓN – TIEMPO NUBLADO</b>			
<b>FECHA</b>	<b>LIXIVIADO ASPERJADO (l)</b>	<b>LIXIVIADO REMANENTE (l)</b>	<b>EFICIENCIA DE EVAPORACIÓN (%)</b>
<b>16/10/2017</b>	1.296	420	67,59
<b>19/10/2017</b>	1.296	450	65,28
<b>25/10/2017</b>	1.296	455	64,89

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Verificando la eficiencia de evaporación en la tabla 12, vemos que el proceso de evaporación del lixiviado tratado durante el tiempo nublado tiene eficiencia de evaporación promedio de 65,92%, siendo un ligero problema porque se podría presentar una escorrentía sobre los vasos semiclausurados por la alta humedad que tendría el terreno.

*Figura 22*

*Recolección del lixiviado en el material sintético*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

7.4.2.4. *Tiempo lluvioso.* Durante este tiempo, no se realizó la prueba piloto de aspersión por la alta humedad del sitio de la prueba, adicional que es nula la evaporación. Si se hubiera presentado esta prueba, estarían presentes las escorrentías y estancamiento del lixiviado en los suelos.

Finalizadas las pruebas en la temporada seca y nublada, se realiza el análisis de los resultados obtenidos y se comparan para generar la propuesta basados en la eficiencia de evaporación en función de las condiciones de climáticas.

Teniendo en cuenta los datos registrados en las tablas 11 y 12, se evidencia una alta eficiencia del sistema de aspersión del lixiviado tratado durante la prueba en tiempo seco, al asperjar  $1,29 \text{ m}^3$  de lixiviado teniendo un remanente promedio de  $0,163 \text{ m}^3$  marcando una eficiencia de evaporación promedio es de 87,40%, dando cabida a la viabilidad de la prueba para lo que se desea implementar. Con respecto a la prueba piloto en tiempo nublado, la eficiencia de evaporación promedio es de 65,92%, siendo un leve problema por la generación de escorrentía en el terreo de trabajo dada la baja radiación solar.

A partir de la prueba se puede proyectar el sistema propuesto y los  $\text{m}^3$  evaporados por día de la siguiente manera:

El sistema planteado cuenta con 346 aspersores con capacidad de 0.06 l/s por unidad y un tiempo de trabajo de 8 horas diarias aprovechando el máximo tiempo de sol durante el día, para un total de  $335,23 \text{ m}^3$  de lixiviado asperjado con una evaporación efectiva de  $293 \text{ m}^3$  diarios vs  $204,48 \text{ m}^3$  generados por el caudal de trabajo actual en planta el cual está en promedio a 2.37 l/s limitando la capacidad de la misma. Con la prueba realizada se demuestra la posibilidad de aumentar el ritmo de trabajo y eficiencia de la planta elevando gradual mente su caudal hasta 3,4 l/s teniendo como

resultado un balance entre el caudal de entrada y el caudal de salida de la laguna de tratamiento, trayendo a su vez, una considerable mejora en los niveles de las lagunas de captación, preparándola para las temporadas de invierno donde se ve más impactado el proceso dado el aumento de la producción de lixiviado en los vasos.

La prueba demuestra que podemos implementar el diseño de un sistema de aspersión teniendo en cuenta la condición del tiempo seco sin que se vea afectada las condiciones ambientales y mejorando la operatividad del Relleno Sanitario.

### ***7.5. Etapa 3: Diseño y Construcción del Sistema de Aspersión.***

Para el diseño y construcción del sistema de aspersión de mayor escala se tomaron algunos factores tales como la topografía del sitio dado que la cota más alta del vaso donde será ubicado el sistema de aspersión, se encuentra a 30 m de altura con respecto a la laguna donde se tiene el lixiviado proveniente de la PTL (Planta de Tratamiento de Lixiviado) y a una distancia de 175 m desde el punto de succión de la bomba, hasta el primer aspersor; se plantea instalar una electrobomba que impulsara el lixiviado en línea recta con pendiente ascendente, desde la laguna tres hacia la plataforma o etapa más alta de los vasos 4, 5 y 6; por medio de una tubería principal donde se realizara un empalme con un bypass hacia dos secciones de tubería las cuales bordean perimetralmente el área formando dos anillos alrededor del vaso, una primera línea ubicada sobre un perímetro de 760 m de longitud en la cuarta etapa del vaso que dispone de 152 aspersores y la segunda sección, estará ubicada en la etapa 3, con 970 m de longitud y 194 aspersores; durante la prueba se determina la necesidad de alternar el uso de cada anillo con el objeto de evitar estancamiento y/o formación de escorrentía.

Se requieren empalmes en las tuberías para extenderlas hasta la longitud requerida e instalación de bridas en los puntos de unión donde será instalado un bypass que secciona el sistema

en dos partes con el objeto de controlar la saturación del suelo, asperjando un sector a la vez además de efectos de mantenimiento, posteriormente con perforaciones y silletas se instalan los ramales que se derivan de los anillos perimetrales para así finalmente instalar los aspersores tipo impacto en la punta de estos y anclarlos al terreno para asperjar el lixiviado.

Se proyecta un total de 346 aspersores divididos en dos secciones una de 194 unidades y la segunda de 152 unidades instalados los cuales, trabajan eficientemente un caudal de 0.06 l/s con un radio de alcance de 9.5 m si se mantiene una presión regular de 2 bares; estos aspersores estarán ubicados estratégicamente para evitar saturación del suelo y minimizar la formación de escorrentía, teniendo en cuenta su radio de alcance, el cual es de 9.5m, se establecerán las distancias requeridas para el aprovechamiento de la superficie.

*Figura 23*

*Bosquejo Sistema De Aspersión.*



Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Tabla 13

*Datos y esquema básico del sistema de aspersión*

<b>DATOS INICIALES</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANT</b>
Distancia del punto de bombeo hasta el sitio de aspersión (m)	175
Altura del sitio de aspersión con respecto al punto de bombeo (m)	30
Altura de succión de la bomba (negativa) (m)	1
Diámetro de tubería principal (pulgadas)	2"
Longitud de la sección de bombeo #1 (m)	760
Longitud de la sección de bombeo #2 (m)	970
Diámetro de tubería en ramales (Pulgadas)	½"
Longitud de cada ramal (m)	12
# de aspersores línea 1	152
# de aspersores línea 2	194
Presión de trabajo de los aspersores (Bar)	2
Densidad del Lixiviado (Kg/m <sup>3</sup> )	1.011
Viscosidad del Lixiviado (Kg/m s)	7,18 x 10 <sup>-4</sup>

Fuente: Marquez J., Granados O., (2017)

Se debe determinar la bomba que se requiere para impulsar el lixiviado por el sistema de tubería y que efectúe la aspersión completa en los vasos 4, 5 y 6 del relleno sanitario. Este cálculo se determina con el uso de las ecuaciones de continuidad y de energía que va en base al caudal de aspersión del fluido; ya que se debe considerar las pérdidas por fricción de cada accesorio y las características del fluido a transportar.

Ya conociendo el sistema de tubería, se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A + h_R + h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

Dónde:

$P_1$ : Presión en el punto 1 = Atmosférica, siendo nulo en el proceso.

$Z_1$ : Altura en el punto 1 = -1 m

$\gamma$ : Gravedad específica del lixiviado = 9,92 KN/m<sup>3</sup>

$v_1$ : Velocidad del fluido en el punto 1 = 0 m/s

$g$ : Aceleración de la gravedad = 9,81 m/s<sup>2</sup>

$P_2$ : Presión en el punto 2 = 69200 KPa correspondiente a la descarga de 346 aspersores.

$Z_2$ : Altura en el punto 2 = 30 m

$v_2$ : Velocidad del fluido en el punto 2 = 30,602 m/s\*

$h_A$ : Energía agregada al fluido [m]

$h_R$ : Energía que se remueve del fluido = 0 m

$h_L$ : Pérdida de energía por fricción en tuberías y accesorios [m]

Ya conociendo las variables a trabajar, resumimos la ecuación 1 a la siguiente expresión:

$$h_A = \frac{P_2}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2}{2g} - h_L \quad (2)$$

Luego conociendo los valores del proceso, aplicamos la fórmula de las pérdidas de energía por fricción:

$$h_L = h_{tubería\ 2"} + h_{tubería\ 1/2"} + h_{Acces} \quad (3)$$

$$h_{tubería} = \left[ \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7(D/\epsilon)} + \frac{5,74}{N_{RE}^{0,9}} \right) \right]^2} \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right] \quad (4)$$



La ecuación 4 aplica para las tuberías de 2" y ½" y las variables son:

$D$ : Diámetro interno de la tubería.

$\epsilon$ : Rugosidad de la tubería plástica =  $3 \times 10^{-7}$  m

$N_{RE}$ : Número de Reynolds con base al fluido que pasa por la tubería.

$L$ : Longitud de la tubería.

$v$ : Velocidad del fluido en el tramo de tubería.

$g$ : Aceleración de la gravedad =  $9,81 \text{ m/s}^2$

$$h_{Acces} = (\#Te * 20f_{2''} + \#Valvulas * 340f_{2''} + \#Contracc * K_{2''-1/2''}) \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (5)$$

$$f_{2''} = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7(D/\epsilon)} + \frac{5,74}{N_{RE}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (6)$$

Dónde:

$f_{2''}$ : Factor de fricción en la tubería de 2"

$D$ : Diámetro interno de la tubería.

$\epsilon$ : Rugosidad de la tubería plástica =  $3 \times 10^{-7}$  m

$N_{RE}$ : Número de Reynolds con base al fluido que pasa por la tubería.

$K_{2''-1/2''}$ : Coeficiente de resistencia del accesorio de contracción súbita de 2" a ½". Se determina con la tabla de coeficiente de resistencia obtenida del libro de Mecánica de Fluidos de Robert L. Mott Sexta Edición.

#*Te*: Número de accesorios de Te de 2"= 346

#*Válvulas*: Número de válvulas usadas en la línea de tubería de 2" = 8

# *Contracc*: Número de contracciones súbitas usadas en el sistema de tubería = 346

*v*: Velocidad del fluido en el tramo de tubería.

Ya conociendo las ecuaciones a utilizar y las condiciones del proceso, procedemos a efectuar los cálculos respectivos para determinar  $h_A$ .

Primero obtenemos  $h_{tubería\ 2"}$  con la ecuación 4:

$$N_{RE} = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (7)$$

$$N_{RE} = \frac{0,0277 \frac{m}{s} \times 0,0525\ m \times 1.011 Kg/m^3}{7,18 \times 10^{-4} \frac{Kg}{m \cdot s}}$$

$$N_{RE} = 2047,69$$

$$h_{tubería\ 2"} = \left[ \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7(D/\epsilon)} + \frac{5,74}{N_{RE}^{0,9}} \right) \right]^2} \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right]$$

$$h_{tubería\ 2"} = \left[ \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7(0,0525\ m/3 \times 10^{-7} m)} + \frac{5,74}{(2047,69)^{0,9}} \right) \right]^2} \times \frac{1905\ m}{0,0525\ m} \times \frac{(0,0277\ m/s)^2}{2 \times 9,81\ m/s^2} \right]$$

$$h_{tubería\ 2"} = [0,0506 \times 36285,71 \times 3,911 \times 10^{-5} m]$$

$$h_{tubería\ 2''} = 0,0718\ m$$

Ahora calculamos  $h_{tubería\ 1/2''}$  con la ecuación 4:

$$N_{RE} = \frac{vD\rho}{\mu}$$

$$N_{RE} = \frac{0,30602 \frac{m}{s} \times 0,0158\ m \times 1.011\ Kg/m^3}{7,18 \times 10^{-4} \frac{Kg}{m \cdot s}}$$

$$N_{RE} = 6808,22$$

$$h_{tubería\ 1/2''} = \left[ \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7(D/\epsilon)} + \frac{5,74}{N_{RE}^{0,9}} \right) \right]^2} \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \right]$$

$$h_{tubería\ 1/2''} = \left[ \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7(0,0158\ m/3 \times 10^{-7} m)} + \frac{5,74}{(6808,22)^{0,9}} \right) \right]^2} \times \frac{4152\ m}{0,0158\ m} \times \frac{(0,30602\ m/s)^2}{2 \times 9,81\ m/s^2} \right]$$

$$h_{tubería\ 1/2''} = [0,0346 \times 262784,81 \times 4,773 \times 10^{-3} m]$$

$$h_{tubería\ 1/2''} = 43,397\ m$$

Seguimos con el cálculo de  $h_{Acces}$  con la ecuación 5:

$$h_{Acces} = (\#Te * 20f_2'' + \#Valvulas * 340f_2'' + \#Contracc * K_{2''-1/2''}) \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

$$f_2'' = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7(0,0525\ m/3 \times 10^{-7} m)} + \frac{5,74}{(2047,69)^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f_{2''} = 0,0506$$

$$h_{Acces} = ([346 * 20(0,0506)] + [8 * 340(0,0506)] + [346 * K_{2'' - 1/2''}]) \left( \frac{(0,0277 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \right)$$

El valor de  $K_{2'' - 1/2''}$  se elige en la siguiente tabla:

Tabla 14

*Coeficiente de resistencia de la contracción súbita.*

$D_1/D_2$	0.6 m/s 2 pies/s	1.2 m/s 4 pies/s	1.8 m/s 6 pies/s	2.4 m/s 8 pies/s	3 m/s 10 pies/s	4.5 m/s 15 pies/s	6 m/s 20 pies/s	9 m/s 30 pies/s	12 m/s 40 pies/s
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.1	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
1.2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11
1.4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20
1.6	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24
1.8	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29	0.27
2.0	0.38	0.37	0.37	0.36	0.36	0.34	0.33	0.31	0.29
2.2	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.35	0.33	0.30
2.5	0.42	0.42	0.41	0.40	0.40	0.38	0.37	0.34	0.31
3.0	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.40	0.39	0.36	0.33
4.0	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.42	0.41	0.37	0.34
5.0	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42	0.38	0.35
10.0	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43	0.40	0.36
$\infty$	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47	0.45	0.44	0.41	0.38

Fuente: Mecánica de fluidos Robert L. Mott. Sexta Edición (2006). Determinación de coeficiente de resistencia.

Tabla 10.3 Pág. 289.

El valor cerrado en círculo, corresponde al valor requerido, ya que es el requerimiento mínimo del valor de velocidad que es de 0,6 m/s y la relación de diámetros (2'' a 1/2'') es de 4.

Seguimos con el reemplazo de los valores con la ecuación 4:

$$h_{Acces} = (350,152 + 137,632 + [346 * 0,47])(3,911 \times 10^{-5} m)$$

$$\mathbf{h_{Acces} = 0,0254 m}$$

Ahora determinamos el valor de  $h_L$  utilizando la ecuación 3:

$$h_L = h_{tubería\ 2"} + h_{tubería\ 1/2"} + h_{Acces}$$

$$h_L = 0,0718 m + 43,397 m + 0,0254 m$$

$$\mathbf{h_L = 43,4942 m}$$

Ya procederemos a calcular el valor de  $h_A$  con la ecuación 1 con los valores obtenidos anterior para seguir con la selección de la bomba:

$$h_A = \frac{P_2}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2}{2g} - h_L$$

$$h_A = \frac{346 \times 200\ KN/m^2}{9,92\ KN/m^3} + (30\ m - (-1m)) + \frac{(0,30602\ m/s)^2}{2 \times 9,81\ m/s^2} - 43,4942\ m$$

$$h_A = 6975,81\ m + 31\ m + (4,77 \times 10^{-3}\ m) - 43,4942\ m$$

$$\mathbf{h_A = 6963,31 m}$$

Para determinar la potencia de la bomba, aplicamos la siguiente ecuación:

$$P_A = \frac{Q\gamma h_A}{e_{Bomba}} \quad (8)$$

Dónde:

$P_A$ : Potencia requerida de la bomba [KW]

$Q$ : Caudal del fluido en la descarga =  $0,00006 \text{ m}^3/\text{s}$

$\gamma$ : Gravedad específica del lixiviado =  $9,92 \text{ KN/m}^3$

$h_A$ : Energía agregada al fluido [m] que se obtiene con la ecuación 2.

$e_{Bomba}$ : Eficiencia de la bomba = 75% (Valor ideal)

$$P_A = \frac{(0,00006 \text{ m}^3/\text{s})(9,92 \text{ KN/m}^3)(6963,31 \text{ m})}{0,75}$$

$$P_A = 5,52 \text{ KW} = 7,40 \text{ HP}$$

De acuerdo con los cálculos y teniendo en cuenta el número de aspersores, el diseño demanda una electrobomba con potencia de 8HP y una línea de descarga de 2" para abastecer el circuito de aspersores a razón de 0.06l/s por unidad instalada.

Una vez puesta en marcha la prueba piloto y conociendo la eficiencia del sistema, se tiene en cuenta la proyección del funcionamiento y rendimiento teórico de 346 aspersores los cuales se contemplan en el circuito partiendo de la dimensión del área a trabajar; este sistema supone la utilización de 346 unidades de aspersores seccionados en dos partes, un primer anillo con 152 unidades instaladas y un segundo anillo con capacidad de 194 aspersores que estarán dispuestos y trabajando alternadamente en los dos últimos niveles de los vasos (parte más alta), con el objeto de evitar saturación del terreno por lixiviado remanente.

Con respecto a la prueba en clima nublado y con base a la prueba piloto, la eficiencia de evaporación está con un valor promedio de 65,92% de eficiencia, lo anterior debido a la evidente

carencia de irradiación solar sobre el terreno la cual es en efecto, la encargada de la evaporación del lixiviado asperjado y por consiguiente causante de encharcamiento y escorrentías de lixiviado en el área de trabajo, lo cual no propone una práctica de uso sobre el sistema más controlado durante las épocas de lluvia durante el año para la zona en la que está situado el relleno sanitario en cuestión.


Teniendo en cuenta lo anterior, se considera como mejor opción el aprovechamiento de la eficiencia del sistema durante clima soleado, obteniendo el máximo rendimiento para el control de niveles de lixiviado acumulado en lagunas y entendiendo su baja eficiencia durante temporada invernal o días nublados.

En síntesis, al eficacia del sistema de evaporización por aspersores, se mide en términos cuantificables y cualificables, lo cual, lo hace beneficioso para implementarlo en un relleno sanitario, que cumpla con las condiciones geográficas y climáticas para su uso. Es menester, recordar la capacidad de evaporización de la laguna por día, que oscila en  $293 \text{ m}^3$  a través de factores meramente climáticos.

## 7.6. RECOMENDACIONES

Al determinar la eficacia, el sistema de riego por aspersión del lixiviado a través del proceso de evaporización, frente a otros sistemas de evaporización, como el sistema de evaporación estática y dinámica, y de evaporación forzada; demuestra el grado de eficiencia en términos de resultado obtenido en la prueba piloto, debido a que, en tiempo seco, se logró la evaporización del 87,40% del lixiviado, al asperjar  $1,29 \text{ m}^3$ ; mientras, en tiempo nublado el 65,92%, datos por encima de la media. En cambio, sistemas de evaporización como el de evaporización estática, sistemas de evaporización como el de evaporización estática, referenciado por Alarcón en la descripción del sistema de evaporización relleno sanitario de Santiago de Chile, en cantidades  $\text{m}^3$  semejantes al de las lagunas de lixiviado del relleno sanitario de Barranquilla, solo evaporan el 60%, referenciado por Alarcón en la descripción del sistema de evaporización relleno sanitario de Santiago de Chile. También existe el sistema de evaporización forzada, reseñado por Batallán, que consiste en la instalación de evaporadores atmosféricos, trayendo como consecuencia la producción de lodos de más de 7% de volumen.

También, con relación al sistema de recirculación y evaporación de lixiviados en el relleno sanitario, la prueba piloto y el diseño del sistema de aspersión, se presenta las siguientes consideraciones:

-  Se sugiere implementar un programa de monitoreo y seguimiento que ayude a garantizar la estabilidad sobre las masas de residuos que se verán inmersas en el proceso de evaporación y/o recirculación, que conste de la verificación a través de piezómetros de hilo vibrátil instalados sobre las áreas en operación. Así como también, incluir el seguimiento a posibles impactos tales como: Alteración del recurso hidrobiológico en los cuerpos de agua, cambios en el balance ecológico de los posibles ecosistemas acuáticos



presentes, afectación de la calidad del suelo, aceleración de procesos erosivos o expansivos, disminución de la cobertura vegetal en las áreas intervenidas, afectación de los procesos de microdenaje, afectación de la calidad fisicoquímica y bacteriológica del recurso hídrico.

- ✚ Según los análisis de estabilidad llevados a cabo en diferentes vertederos de RSU del país, concluyen que para garantizar la estabilidad de un relleno sanitario, es necesario mantener los niveles de lixiviado a una altura menor del 50% de la altura del relleno en cada sitio, para lo cual los sistemas de recolección y extracción de lixiviados y de recolección y control de gases deberán diseñarse, construirse, operarse y mantenerse de tal manera que estos niveles no sean superados
- ✚ Se sugiere la incorporación de coronas o jarillones perimetrales sobre las plataformas finales de los vasos clausurados y/o semi clausurados con la finalidad, de dar un manejo adecuado y seguro a las eventuales escorrentías que pueda generar el sistema; manteniéndolas en la parte superior del vaso, asegurando su posterior evaporación o encauce hacia las chimeneas presentes en el área, garantizando la recirculación sobre la masa de residuos.
- ✚ Al verificar las características del lixiviado y las condiciones climáticas que cuenta el relleno sanitario, se debe realizar el sistema de aspersión en tiempos secos para alargar el proceso de evaporación y así lograr la reducción del nivel de la laguna que retiene el lixiviado tratado. Adicional que permite que la planta de tratamiento pueda aumentar su caudal de operación y optimizar el proceso para disminuir los niveles operativos de las lagunas que retienen el lixiviado crudo.

- ✚ En el caso del relleno sanitario de Barranquilla, se selecciona esta alternativa de carácter complementario al sistema de tratamiento existente, para optimizar las características del proceso de disposición final del lixiviado.
- ✚ Con el fin de garantizar la eficiencia del sistema de aspersión para el relleno sanitario, se debe realizar un seguimiento y monitoreos del proceso;
  - Realizar seguimiento de las condiciones climáticas que se dan en el área donde está ubicado el relleno sanitario para considerar el uso del sistema de aspersión.
  - Al momento de construir el sistema de aspersión, se debe contar con válvulas operativas para cada nivel donde se construirá el sistema, con la finalidad de efectuar el riego del lixiviado tratado alternando el área operativa sin que se sature el terreno y lograr la continuidad en la evaporación del lixiviado.
  - Inspección y mantenimiento a las líneas de conducción del sistema identificando y corrigiendo las obstrucciones o sedimentos que puedan taponar la salida eficiente del lixiviado y no forzar el sistema.
  - Verificar la saturación del terreno cuando se realice la aspersión, implementando como correctivo el cambio de la línea de aspersión o en su defecto, suspender la aspersión hasta que el terreno se recupere y esté en óptimas condiciones para retomar el proceso.
- ✚ Efectuar un registro del sistema de aspersión y verificar los niveles de la laguna de lixiviado tratado para considerar el aumento del caudal de tratamiento en la planta de lixiviados permitiendo un equilibrio en los caudales y contingencia para las épocas invernales.

- ✚ La eficacia del sistema de aspersión depende de la voluntad política de la empresa, en la implementación de los 346 aspersores, garantizando en términos de tiempo y cantidad promedio de evaporización, unos resultados mayormente favorables.
- ✚ Se debe buscar una forma artificial o alternativa de aspersión en temporada de inviernos, ejemplo de ello, puede ser anexar el sistema de aspersión a las chimeneas de biogás, cuyas altas temperaturas constantes, garantizarían la evaporización del lixiviado, sin depender tanto de las condiciones climatológicas.
- ✚ Aunque el sistema riego de evaporización por aspersores es altamente eficiente, no se debe desmeritar o desistir de los anteriores sistemas de manejo y tratamiento del lixiviado del relleno sanitario.

## 8. PRESUPUESTO

MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)	PRECIO TOTAL (\$)
Tubería polietileno de 2"	M	2100	442.857,15	\$ 9.300.000,00
Tubería polietileno de ½"	M	4300	33.150 / 50 m	\$ 2.850.000,00
Aspersores	Cajas	500	7.300,00	\$ 3.650.000,00
Equipo Bombeo	Bomba de descarga de 2" y 8 HP	1	2.900.000,00	\$ 2.900.000,00
Acoples con brida		12	75.000,00	\$ 900.000,00
Válvulas		8	150.000,00	\$ 1.200.000,00
Instalación	m	1904	1.300.000,00	\$ 1.300.000,00
Subtotal				\$ 22.100.000,00
IVA 19%				\$ 4.199.000,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$</b>	<b>26.299.000,00</b>
Electricidad*	KWh/mes	705,6	466.14	\$ 308.908,00
Mantenimiento de la bomba*	Mensual	1	120.000	\$ 120.000,00
Recurso humano (una persona)*	Diario	3 horas	3580	\$ 322.200,00
Subtotal				\$ 751.108,00
IVA 19%				\$ 142.710,52
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 893.818,52</b>

Fuente: Marquez J., Granados O., (2018)

*\*Nota: Los costos indirectos (mantenimiento de la bomba y electricidad) son mensuales, así que el costo es variable por el uso o las fallas de los equipos.*

## CONCLUSIÓN

A lo largo del presente proyecto de investigación, se buscó adoptar un diseño que satisficiera la necesidad de darle un manejo eficaz a la problemática que genera el tratamiento de lixiviados en el relleno de Barranquilla. Aunque sigue siendo una tarea ardua, se reconoce el esfuerzo de la empresa en darle tratamiento y disposición final a este tipo de líquido, a través de los sistemas y procesos adoptados, que si bien, no son del todo eficientes, si ayudaban en su manejo.

Es por ello, que al empezar analizando la cantidad promedio de lixiviado tratado por la planta de lixiviado en el relleno sanitario, el panorama no fue alentador, debido a que se identificó la capacidad de la laguna de 6.000 m<sup>3</sup> cuyo caudal de tratamiento ejecutado en la operación era limitado para no sobrepasarla; ahora bien, el caudal de tratamiento es en promedio durante el año inmediatamente anterior (2018) es de 2.37 l/s y genera 204,48 m<sup>3</sup> al día por tanto no se puede aumentar debido a la falta de un sistema de eliminación del mismo que mantenga el nivel de la laguna estable o en balance con el caudal de tratamiento; con lo anteriormente reseñado, se deduce que al aumentar la capacidad de transición del lixiviado tratado en la laguna y por consiguiente la operatividad de la planta de tratamiento de lixiviados, este puede llegar a elevar su caudal de tratamiento para liberar espacio también en las lagunas 1 y 2 (lagunas de lixiviado crudo).

En términos prácticos, la eficacia del diseño del sistema de aspersión y su implementación, radica a través de la prueba piloto determinar la capacidad de evaporación del sistema de aspersión, bajo condiciones climáticas descritas en la tabla 9. La prueba piloto arrojó como resultado, una aspersión de 335,23 m<sup>3</sup>/día de lixiviado, de los cuales 293 m<sup>3</sup> logran evaporarse por acción del factor climático y los otros 42,2 m<sup>3</sup> recircula hacia los vasos; de lo

anterior se concluye una eficiencia de evaporación mayor al 85% en un clima soleado, obteniendo los siguientes beneficios para la operación:

- ✓ Eliminación o disposición final eficiente del lixiviado tratado el cual actualmente se encuentra en proceso de recirculación y en aumento por la continua generación proveniente de los vasos clausurados y activos.
- ✓ Bajos niveles para eliminar riesgo de desborde en la laguna de lixiviado tratado dada su capacidad de almacenamiento limitada y significativamente menor a las lagunas de captación.
- ✓ Bajo nivel en las lagunas de lixiviado crudo, aportando mayor capacidad almacenadora como preparación y contingencia para las épocas invernales.
- ✓ Aumento de caudal de trabajo en la planta de tratamiento manteniendo un equilibrio en las entradas y salidas del proceso eliminando el remanente actual por la diferencia del caudal de entrada vs la capacidad de tratamiento del mismo.
- ✓ Rentabilidad en costos por metros cúbicos de lixiviado tratado, dada la reducción de la cantidad de lixiviado que finalmente recircularía a la planta.

Para finalizar, de las pruebas realizadas se sintetiza con una serie de recomendaciones para el diseño de un sistema de aspersión sobre los vasos semiclausurados, que cuentan con el área adecuada para poder ser evaporada y/o absorbida por el terreno}; estos a su vez tienen, sus accesorios requeridos y la capacidad adecuada de una electrobomba con capacidad de alimentar los 346 aspersores propuestos en el diseño.

## BIBLIOGRAFIA

Arbeláez, M., & García, J. E. (2010). *Estudio De Las Tecnologías Empleadas Para El Manejo De Lixiviados Y Su Aplicabilidad En El Medio*. Universidad de EAFIT. Colombia.

Arias F. & Gonzalez M. (2009). Estrés, Agotamiento Profesional (burnout) y Salud en Profesores de Acuerdo a su Tipo de Contrato. *Ciencia y Trabajo*, (33), pp. 172- 176

Arroyos de Barranquilla (2017). *Clima en Barranquilla*. Recuperado de <http://www.arroyosdebarranquilla.co/servicios/barranquilla/clima-escolar>

Balderas Luna, R. S.F. *Disposición Final*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/47324661/DISPOSICION-FINAL>.

Bono (s.f). DISEÑOS CUASI-EXPERIMENTALES Y LONGITUDINALES. Universidad de Barcelona. Referenciado de :  
<http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/30783/1/D.%20cuasi%20y%20longitudinale>  
s.pdf Pag. 12

Bustos Castro, M. F. (2018). *Uso del Óxido de Grafeno como Floculante para el Tratamiento en el Lixiviado del Relleno Sanitario Doña Juana*. Universidad de la Salle. Colombia.

Carrillo & Anrango Pavón. (2018). *Métodos alternativos para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del Cantón Mejía, Pichincha, Ecuador*. Universidad Internacional SEK. Ecuador.

Consultoría y Dirección de Proyectos S.A.S. (2017). *Contrato N° 1016 de 2016 Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de Girardot*. Alcaldía de Girardot, Cundinamarca.

Corena, M. & Luna, V. (2010). *Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios*. Universidad de Sucre. Colombia.

COGERSA Gobierno del Principado de Asturias. (2011). *Tratamiento de Lixiviados*. Recuperado de <http://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19173>.

El boletín de novedades de Jenck, (2013). *Determinación rápida de la Carga Orgánica . Mitos y Verdades*. Recuperado de <https://www.notijenck.com.ar/notas/determinacion-rapida-de-la-carga-organica-mitos-y-verdades>.

Gestión y tratamiento de los residuos sólidos. (2018). Residuos urbanos y sus problemáticas. Recuperado de <http://www2.uned.es/biblioteca/rsu/pagina1.htm>

Giraldo, E. (2001). *Tratamiento de Lixiviados de Relleno Sanitarios: Avances Recientes*. Universidad de los Andes. Colombia.

Inforeciclaje. (2011). *Residuos Sólidos*. Recuperado de <http://www.inforeciclaje.com/residuos-solidos.php>.

Interssa. (2017). *Riego por Aspersión*. Recuperado de [http://interssa.net/legionella/riego\\_aspersion](http://interssa.net/legionella/riego_aspersion).



Laboratorio LCN. (2012). *Conceptos y Bibliografías. Contaminante*. Recuperado de <http://www.laboratoriolcn.com/conceptos-y-bibliografia/page-3>.

López y Santos (2017). La recirculación de lixiviados de rellenos sanitarios en biodigestores a escala de laboratorio. *Revista RTQ* vol.37 no.3

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Decreto No. 838 de 2005 modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones*. República de Colombia.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. *Decreto Número 1077 de 2015 Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio*. República de Colombia.

Moraes da Costa, F., Alves Daflon, S., Maia Bila, D., Da Fonseca, F., & Carbonelli Campos, J. (2018). *Uso de Procesos Oxidativos Avanzados como etapa de tratamiento de lixiviado de relleno sanitario con énfasis en la evaluación de la toxicidad*. Universidad de Río de Janeiro. Brasil.

Neczaj, E., Kacprzak, M., Kamizela, T., Lach, J., & Okoniewska, E. (2008). *Sequencing batch reactor system for the co-treatment of landfill leachate and dairy wastewater*. *Desalination*, 222, 404-409.

Ocampo M. F. & Londoño A. (2016). *Coeficientes de Partición de Mercurio en Lixiviados del Relleno Sanitario la Esmeralda*. Universidad Militar Nueva Granada. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* VOL. 12 2016-1. Colombia.

Página de Definicion.de, (2018). *Definiciones de: Biogas, drenaje, Efluente, Evaporación, Humedad, impactos ambientales, Relleno Sanitario, Residuos Sólidos*. Recuperado de <https://definicion.de/>.

Pequeño Larousse Ilustrado (2009). *Definiciones de: Aspersión y Biodegradación, infiltración, Permeabilidad*. Madrid. España: Editorial Larousse.

Rain-Bird. (2018). *Aspersores de impacto: Bronce o plástico y Círculo completo o parcial*. Recuperado de [http://www.rainbird.com.mx/documents/impact\\_sp.pdf](http://www.rainbird.com.mx/documents/impact_sp.pdf).

Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F. & Moulin, P. (2008). *Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity*. Journal of Hazardous Materials, 150, 468-493.

Romero Batallán, A. (2010). *Aprovechamiento Integral de Lixiviados*. Universidad de Salamanca. Colombia.

SEFILTRA S.A. (2018). *Osmosis Inversa*. Recuperado de <http://www.sefiltra.com/osmosis-inversa-purificacion-agua.php>.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. and Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. 6th ed. México, D.F.: McGraw-Hill Education, p.151.

Szantó, M., Piraino, E. & Arancibia, C. (2011). *Criterios para el Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios mediante Evaporación por Radiación Solar*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Brasil.

Triple A S.A. E.S.P. (2006). *Estudio de impacto ambiental Parque Ambiental Los Pocitos Plan de Manejo Ambiental del Relleno Sanitario Los Pocitos*. Barranquilla, Colombia.

Universidad Pontificia Bolivariana ( Septiembre 2016). *Manejo adecuado de los residuos sólidos*. Recuperado de <https://www.upb.edu.co/es/seguridad-salud-trabajo/manejo-adecuado-de-residuos-solidos>.

Vicente Alarcón, D. (2012). *Optimización del proceso de evaporación de lixiviados en el relleno sanitario Santiago Poniente*. Universidad de Chile. Chile.

Viva Solar Colombia. (2017). *Eficiencia de evaporación*. Recuperada de <https://www.vivasolarcolombia.com/energ%C3%ADa-solar/eficiencia/>

## ANEXOS

Fotografía 1. Vista Interna Relleno Sanitario.



Fotografía 2. Vasos Semiclausurados.



Fotografía 3 y 4. Muestra Lixiviado Tratado.





Fotografía 5 y 6. Laguna de lixiviado tratado.



